

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
19. Juni 2003 (19.06.2003)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 03/050587 A2

(51) Internationale Patentklassifikation⁷: **G02B 17/08**

(21) Internationales Aktenzeichen: **PCT/EP02/08037**

(22) Internationales Anmeldedatum:
19. Juli 2002 (19.07.2002)

(25) Einreichungssprache: **Deutsch**

(26) Veröffentlichungssprache: **Deutsch**

(30) Angaben zur Priorität:
60/339,275 10. Dezember 2001 (10.12.2001) **US**

(71) Anmelder: **CARL ZEISS SEMICONDUCTOR MANUFACTURING TECHNOLOGIES AG [DE/DE]**; Carl-Zeiss-Strasse 22, 73447 Oberkochen (DE).

(72) Erfinder: **SHAFFER, David, R.**; 56 Drake Lane, Fairfield, CT 06430 (US). **EPPLÉ, Alexander**; Langerstrasse 38, 73431 Aalen (DE). **ULRICH, Wilhelm**; Lederackerring 44, 73434 Aalen (DE).

(74) Anwalt: **RUFF, WILHELM, BEIER, DAUSTER & PARTNER**; Kronenstrasse 30, 70174 Stuttgart (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (*national*): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KB, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NO, NZ, OM, PH, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, UZ, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(84) Bestimmungsstaaten (*regional*): ARIPO-Patent (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches Patent (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches Patent (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, SK, TR), OAPI-Patent (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— *ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts*

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

(54) Title: **CATADIOPTRICAL REDUCTION LENS**

(54) Bezeichnung: **KATADIOPTRISCHES REDUKTIONSOBJEKTIV**

(57) Abstract: A catadioptrical projection lens, which produces an image in an image plane of a model, arranged in an object plane, by generation of a real intermediate image, has a catadioptrical first objective piece, a concave mirror and a beam diverter device between the object plane and the image plane and, beyond the beam diverter device, a dioptrical second objective piece. The beam diverter device has a preferably fully-reflective first mirror surface, for diverting the radiation arriving from the object plane onto the concave mirror. In an optically close region to the object plane, in which the height of the main beam of the radiation emanating from the object is greater than the height of the boundary beam, a positive refractive element is arranged behind the first mirror surface, between the above and the concave mirror. An object-side, telecentric projection lens may thus be produced with relatively small lens dimensions and easily corrected with moderate requirements for the coating of the mirror surfaces.

(57) Zusammenfassung: Ein katadioptrisches Projektionsobjektiv, welches ein in einer Objektebene angeordnetes Muster unter Erzeugung eines reellen Zwischenbilds in eine Bildebene abbildet, hat zwischen der Objektebene und der Bildebene einen katadioptrischen ersten Objektivteil und einen Konkavspiegel und einer Strahlumlenkeinrichtung und hinter der Strahlumlenkeinrichtung einen dioptrischen zweiten Objektivteil. Die Strahlumlenkeinrichtung hat eine vorzugsweise vollreflektierende erste Spiegelfläche zur Umlenkung der von der Objektebene kommenden Strahlung zum Konkavspiegel. In einem optischen Nahbereich der Objektebene, in welchem die Hauptstrahlhöhe des äußersten Feldpunktes der vom Objekt kommenden Strahlung größer ist als die Randstrahlhöhe, ist hinter der ersten Spiegelfläche zwischen dieser und dem Konkavspiegel positive Brechkraft angeordnet. Dadurch ist ein objektseitig telezentrisches Projektionsobjektiv möglich, das bei moderaten Anforderungen an die Beschichtung von Spiegelflächen gut korrigierbar und mit relative kleinen Linsendimensionen realisierbar ist.

WO 03/050587 A2

Beschreibung
Katadioptrisches Reduktionsobjektiv

Die Erfindung betrifft ein katadioptrisches Projektionsobjektiv zur Abbildung eines in einer Objektebene angeordneten Musters in eine Bildebene.

Derartige Projektionsobjektive werden in Projektionsbelichtungsanlagen zur Herstellung von Halbleiterbauelementen und anderen feinstrukturierten Bauteilen verwendet, insbesondere in Waferscannern und Wafersteppern. Sie dienen dazu, Muster von Photomasken oder Strichplatten, die nachfolgend allgemein als Masken oder Retikel bezeichnet werden, auf einen mit einer lichtempfindlichen Schicht beschichteten Gegenstand mit höchster Auflösung in verkleinerndem Maßstab zu projizieren.

Dabei ist es zur Erzeugung immer feinerer Strukturen notwendig, einerseits die bildseitige numerische Apertur (NA) des Projektionsobjektivs zu vergrößern und andererseits immer kürzere Wellenlängen zu verwenden, vorzugsweise Ultraviolettlicht mit Wellenlängen von weniger als ca. 260 nm.

In diesem Wellenlängenbereich stehen nur noch wenig ausreichend transparente Materialien zur Herstellung der optischen Komponenten zur Verfügung, insbesondere synthetisches Quarzglas und Fluoridkristalle, wie Calciumfluorid, Magnesiumfluorid, Bariumfluorid, Lithiumfluorid, Lithium-Kalzium-Aluminium-Fluorid, Lithium-Strontium-Aluminium-Fluorid o. dgl. Da die Abbékonstanten der verfügbaren Materialien relativ nahe beieinander liegen, ist es schwierig, rein

refraktive Systeme mit ausreichender Korrektur von Farbfehlern (chromatische Aberration) bereitzustellen. Dieses Problem wäre durch Nutzung rein reflektiver Systeme lösbar. Jedoch ist die Herstellung derartiger Spiegelsysteme aufwendig.

5

In Anbetracht der obigen Probleme werden für höchstauflösende Projektionsobjektive der genannten Art überwiegend katadioptrische Systeme verwendet, bei denen brechende und reflektierende Komponenten, insbesondere also Linsen und Spiegel, kombiniert sind.

10

Bei der Nutzung von abbildenden Spiegelflächen ist es erforderlich, Strahlumlenkeinrichtungen einzusetzen, wenn eine obskurationsfreie und vignettierungsfreie Abbildung erreicht werden soll. Es sind sowohl Systeme mit einem oder mehreren voll reflektierenden Umlenkspiegeln, als auch Systeme mit physikalischen Strahlteilern bekannt. Darüber hinaus können weitere Planspiegel zur Faltung des Strahlengangs verwendet werden. Diese werden im allgemeinen nur verwendet, um Bauraumanforderungen zu erfüllen, insbesondere um Objekt- und Bildebene parallel zueinander auszurichten. Diese Faltungsspiegel sind optisch nicht zwingend erforderlich.

20

Systeme mit einem physikalischen Strahlteiler, beispielsweise in Form eines Strahlteilerwürfels (BSC, beam splitter cube), haben den Vorteil, dass axiale (on-axis) Systeme realisierbar sind. Hier werden z.B.

25 polarisationsselektiv wirksame Spiegelflächen eingesetzt, die abhängig von der Polarisationsvorzugsrichtung der auftreffenden Strahlung reflektierend oder transmittierend wirken. Nachteilig an solchen Systemen ist, dass geeignete transparente Materialien kaum in den erforderlich großen Volumina verfügbar sind. Außerdem kann die Herstellung der optisch wirksamen Strahlteilerschichten innerhalb der Strahlteilerwürfeln erhebliche Schwierigkeiten machen. Dies gilt insbesondere dann, wenn an der Spiegelfläche große Inzidenzwinkel

30

und/oder eine große Winkelbandbreite der auftretenden Strahlung vorliegen.

- Ein Beispiel für ein System mit physikalischem Strahlteiler ist in der EP-A-0 475 020 (entsprechend US-A-5, 052,763) gezeigt. Hier liegt die Maske direkt auf einem Strahlteilerwürfel auf, und das Zwischenbild liegt hinter der Strahlteilerfläche im Inneren des Strahlteilerwürfels. Ein anderes Beispiel ist in der US-A-5, 808,805 bzw. der zugehörigen Continuation-Anmeldung US-A-5, 999,333 gezeigt. Hier liegt zwischen der Objektebene und einem Strahlteilerwürfel eine mehrlinsige Linsengruppe mit positiver Brechkraft. Das gesammelte Lichtbündel wird zunächst von der Polarisationsstrahlteilerfläche in Richtung eines Konkavspiegels gelenkt und von diesem zurück in den Strahlteilerwürfel und durch die Strahlteilerfläche in Richtung der nachfolgenden Linsengruppe mit insgesamt positiver Brechkraft reflektiert. Das Zwischenbild liegt innerhalb des Strahlteilerwürfels in unmittelbarer Nähe der Strahlteilerfläche.

- Nachteile von Systemen mit Strahlteilerwürfel können bei Systemen mit einem oder mehreren Umlenkspiegeln in der Strahlumlenkeinrichtung teilweise vermieden werden. Diese Systeme haben allerdings den prinzip-bedingten Nachteil, dass es sich zwingend um außeraxiale (off-axis) Systeme, d.h. um Systeme mit außeraxialem Objektfeld handelt.

- Ein derartiges katadioptrisches Reduktionsobjektiv ist in der EP-A-0 989 434 (entsprechend US-Serial Nr. 09/364382) beschrieben. Bei diesem sind zwischen der Objektebene und der Bildebene ein katadioptrischer erster Objektivteil mit einem Konkavspiegel und einer Strahlumlenkeinrichtung, und hinter dieser ein dioptrischer zweiter Objektivteil angeordnet. Die als Spiegelprisma ausgebildete Strahlumlenkeinrichtung hat eine erste Spiegelfläche zur Umlenkung der von der Objektebene kommenden Strahlung zum Konkavspiegel und

- eine zweite Spiegelfläche zur Umlenkung der von diesem reflektierten Strahlung zum zweiten Objektivteils, der nur refraktive Elemente enthält. Zwischen der Objektebene und der ersten Spiegelfläche ist eine Positivlinse angeordnet, deren Brechkraft so bemessen ist, dass der
- 5 Konkavspiegel im Bereich der Pupille liegt. Der katadioptrische erste Objektivteil erzeugt ein reelles Zwischenbild, welches mit geringem Abstand hinter der zweiten Spiegelfläche und mit Abstand vor der ersten Linse des zweiten Objektivteiles liegt. Das Zwischenbild ist dadurch frei zugänglich, was z. B. zur Anbringung einer Leuchtfeldblende genutzt
- 10 werden kann. Große maximale Inzidenzwinkel insbesondere auf der ersten Spiegelfläche stellen erhöhte Anforderungen an die Beschichtung der Spiegel, um eine weitgehend gleichförmige Reflexion der gesamten auftreffenden Strahlung zu gewährleisten.
- 15 Ein anderes Reduktionsobjektiv, das eine Strahlumlenkeinrichtung mit einem Umlenkspiegel aufweist, ist in der US-A-5, 969,882 (entsprechend EP-A-0 869 383) beschrieben. Bei diesem System ist der Umlenkspiegel so angeordnet, dass das von der Objektebene kommende Licht zunächst auf den Konkavspiegel des ersten
- 20 Objektivteiles fällt, bevor es von diesem zum Umlenkspiegel der Strahlumlenkeinrichtung reflektiert wird. Von diesem wird es zu einer weiteren Spiegelfläche reflektiert, die das Licht in Richtung der Linse des rein dioptrischen zweiten Objektivteilers lenkt. Die für die Erzeugung des Zwischenbildes genutzten Elemente des ersten Objektivteils sind so
- 25 ausgelegt, dass das Zwischenbild nahe bei dem Umlenkspiegel der Strahlumlenkeinrichtung liegt. Der zweite Objektivteil dient der Refokussierung des Zwischenbildes auf die Bildebene, die dank der dem Zwischenbild folgenden Spiegelfläche parallel zur Objektebene angeordnet sein kann.
- 30 Die US-A-6, 157,498 zeigt einen ähnlichen Aufbau, bei dem das Zwischenbild auf oder nahe der Spiegelfläche der

Strahlumlenkeinrichtung liegt. Zwischen dieser und einem Umlenkspiegel im zweiten Objektivteil sind einige Linsen des zweiten Objektivteils angeordnet. In unmittelbarer Nähe oder bei dem Zwischenbild ist auch eine asphärische Fläche angeordnet. Hierdurch
5 soll ausschließlich Verzeichnung korrigiert werden, ohne dass andere Bildfehler beeinflusst werden.

Ein Projektionsobjektiv mit verkleinerndem katadioptrischen Teilsystem und Zwischenbild in der Nähe eines Umlenkspiegels einer
10 Strahlumlenkeinrichtung ist in der DE 197 26 058 gezeigt.

In der schon erwähnten US-A-5, 999,333 ist ein anderes katadioptrisches Reduktionsobjektiv mit Umlenkspiegel gezeigt, bei dem das von der Objektebene kommende Licht nach Durchtritt durch eine
15 Linsengruppe mit positiver Brechkraft zuerst auf den Konkavspiegel trifft, von dem es auf die einzige Spiegelfläche der Umlenkeinrichtung reflektiert wird. Das vom katadioptrischen Teil erzeugte Zwischenbild liegt nahe bei dieser Spiegelfläche. Diese reflektiert das Licht zu einem dioptrischen, zweiten Objektivteil, der das Zwischenbild auf die
20 Bildebene abbildet. Sowohl der katadioptrische Objektivteil, als auch der dioptrische Objektivteil haben einen verkleinernden Abbildungsmaßstab.

Ein ähnlicher Objektivaufbau, bei dem ebenfalls das vom katadioptrischen Objektivteil erzeugte Zwischenbild in der Nähe des
25 einzigen Umlenkspiegels der Strahlumlenkeinrichtung liegt, ist in der JP-A-10010429 gezeigt. Die dem Umlenkspiegel nächste Linsenfläche des nachfolgenden dioptrischen Objektivteils ist asphärisch, um besonders wirksam zur Korrektur der Verzeichnung beizutragen.

30 Andere Objektive mit außeraxialem Objektfeld, geometrischer Strahlteilung, einem einzigen Konkavspiegel und Zwischenbild mit

nachfolgendem dioptrischen Teil sind aus den Veröffentlichungen US 5,052,763 A, US 5,691,802 und EP 1 079 253 A bekannt.

Systeme, bei denen das Zwischenbild in der Nähe oder auf einer
5 reflektierenden Fläche liegt, ermöglichen eine kompakte Bauweise.
Zudem kann der zu korrigierende Feldradius dieser außeraxial
beleuchteten Systeme klein gehalten werden, was die Korrektur von
Abbildungsfehlern erleichtert.

10 Katadioptrische Systeme mit Strahlteilern haben generell eine Gruppe
von doppelt durchlaufenen Linsen, die auf dem Lichtweg vom Objektfeld
zum Konkavspiegel und auf dem Lichtweg vom Konkavspiegel zum
Bildfeld durchlaufen werden. In der US 5,691,802 wird vorgeschlagen,
dass diese Linsengruppe positive Brechkraft hat, was zu einem
15 kleineren Durchmesser des Konkavspiegels führen soll. Ein System mit
einer einzelnen doppelt durchlaufene Positivlinse in der Nähe eines
Umlenkspiegels des Strahlleiters ist in der US 6,157,498 beschrieben.

Für Systeme mit zwei katadioptrischen Teilsystemen wurde der Effekt
20 der Verkleinerung des Konkavspiegels zum Beispiel in der US 5,323,263
am Beispiel des zweiten Teilsystems beschrieben.

Andere Dokumente, in denen Systeme mit zwei katadioptrischen
Teilsystemen beschrieben werden, zeigen Halbblinsen oder Teil-Linsen
25 (truncated lens) an Positionen, an welchen das zum Konkavspiegel
laufende Lichtbündel und das vom Konkavspiegel reflektierte
Lichtbündel voneinander getrennt verlaufen und sich somit nicht
überlappen. Beispiele hierfür sind in der EP 0 527 043 A, der EP 0 581
585 B und der JP 8-21955 gezeigt. Diese Halbblinsen sind im
30 allgemeinen mit im wesentlichen brechkraftfreien Korrekturgruppen
kombiniert, z.B. Positiv- und Negativlinsen vom Achromattyp.

Doppelt durchlaufene Linsen haben generell den Nachteil, dass ihre negativen Effekte auf den Lichtstrahl, insbesondere Reflexion und Absorption, zweifach eingeführt werden, während der Vorteil der Einführung eines Freiheitsgrades für die Korrektur der Abbildung nur
5 einmal vorhanden ist, so dass ein Kompromiss zwischen den Effekten auf die zwei Lichtstrahlrichtungen gefunden werden muss.

Auf der anderen Seite sind Verfahren und Methoden zur Fassung von Halblinsen nicht weit entwickelt. Die Fassung von Halblinsen wird durch
10 deren geometrische Asymmetrie erschwert. Dieses Problem wird noch durch die Tatsache verkompliziert, dass die abgeschnittene Seite der Linse für Fassungsteile nicht verfügbar ist, da in den benachbarten Lichtweg nicht eingegriffen werden darf.

15 Insbesondere im Bereich der Mikrolithographie bei 157nm mit sehr hohen Aperturen von beispielsweise $NA=0,80$ und mehr stellt sich das Problem des hohen Materialpreises und nur begrenzter Verfügbarkeit von Kalziumfluorid-Kristallmaterial für große Linsen. Daher sind Maßnahmen erwünscht, die eine Reduzierung der Anzahl und der
20 Größe von Linsen ermöglichen und gleichzeitig dazu beitragen, die Abbildungsqualität zu erhalten oder sogar zu steigern.

Es ist ein Ziel der Erfindung, Nachteile des Standes der Technik zu vermeiden. Gemäß einem Aspekt der Erfindung soll ein
25 Projektionsobjektiv geschaffen werden, das bei moderaten Anforderungen an die optische Beschichtung von Spiegelflächen gut korrigierbar und mit optischen Komponenten moderater Größe konstruierbar ist. Gemäß einem anderen Aspekt der Erfindung soll die Anzahl und die Größe von Linsen bei Aufrechterhaltung oder
30 Verbesserung der optischen Abbildungsleistung verringert werden.

Zur Lösung dieser Aufgabe schlägt die Erfindung katadioptrische Projektionsobjektive mit den Merkmalen der unabhängigen Ansprüche vor. Vorteilhafte Weiterbildungen sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben. Der Wortlaut sämtlicher Ansprüche wird durch Bezugnahme
5 zum Inhalt der Beschreibung gemacht.

Ein katadioptrisches Projektionsobjektiv gemäß einem Aspekt der Erfindung ist zur Abbildung eines in einer Objektebene angeordneten Musters in eine Bildebene unter Erzeugung eines reellen
10 Zwischenbildes ausgebildet. Es hat zwischen der Objektebene und der Bildebene einen katadioptrischen ersten Objektivteil mit einem Konkavspiegel und einer Strahlumlenkeinrichtung und hinter der Strahlumlenkeinrichtung einen zweiten Objektivteil, der vorzugsweise dioptrisch ist, also keine abbildenden Spiegelflächen aufweist. Die
15 Strahlumlenkeinrichtung hat eine erste Spiegelfläche zur Umlenkung der von der Objektebene kommenden Strahlung zum Konkavspiegel. Hinter der ersten Spiegelfläche und somit zwischen dieser und dem Konkavspiegel ist in einem optischen Nahbereich der Objektebene positive Brechkraft angeordnet. Dieser optische Nahbereich zeichnet
20 sich insbesondere dadurch aus, dass dort die Hauptstrahlhöhe der Abbildung größer ist als die Randstrahlhöhe.

Die positive Brechkraft zwischen Objektebene und Konkavspiegel soll dazu beitragen, dass eine Pupillenfläche des Projektionsobjektives im
25 Bereich des Konkavspiegels, d.h. entweder auf dem Konkavspiegel oder in dessen Nähe, liegt. Durch positive Brechkraft geeigneter Stärke im genannten optischen Nahbereich der Objektebene ist zudem eine objektseitige Telezentrie des Objektivs zu erreichen, welche zur Vermeidung von Defokusfehlern auf der Objektseite vorteilhaft ist. Durch
30 die Anordnung der positiven Brechkraft hinter der ersten Spiegelfläche ist es möglich, dass die Hauptstrahlen der Abbildung, die in der Objektebene telezentrisch bzw. weitgehend parallel zur optischen Achse

- des Systems verlaufen, auch auf der ersten Spiegelfläche parallel zur optischen Achse auftreffen. Dies führt gegenüber herkömmlichen Designs, bei denen zwischen der Objektebene und der ersten Spiegelfläche positive Brechkraft angeordnet ist, zu einer deutlichen
- 5 Verringerung der Winkelbelastung der ersten Spiegelfläche. Abhängig vom Neigungswinkel zwischen der ersten Spiegelfläche und der optischen Achse des Projektionsobjektives können dadurch im Vergleich zum Stand der Technik kleinere maximale Inzidenzwinkel und gegebenenfalls auch kleinere Winkelbandbreiten der eintreffenden
- 10 Strahlung an der ersten Spiegelfläche ermöglicht werden. Dadurch sinken bei erfindungsgemäßen Projektionsobjektiven im Vergleich zum Stand der Technik die Anforderung an die Winkelbelastbarkeit der für die erste Spiegelfläche vorgesehenen optischen Beschichtung, so dass relativ einfach aufgebaute Beschichtungssysteme genutzt werden
- 15 können, um eine über den gesamten Inzidenzwinkelbereich weitgehend gleichmäßige Reflektivität zu erzielen. Die hinter der ersten Spiegelfläche angeordnete positive Brechkraft wird bevorzugt durch eine Einzellinse erzeugt.
- 20 Bei bevorzugten Ausführungsformen sind die Inzidenzwinkel der auf die erste Spiegelfläche auftreffenden Strahlung bei einer objektivseitigen numerischen Apertur von 0,2125 nicht größer als ca. 68°, wobei sogar maximale Inzidenzwinkel von nicht mehr als 66° erzielbar sind. Allgemein ermöglicht es die Erfindung, Objektive aufzubauen, bei denen
- 25 die Inzidenzwinkel auf der ersten Spiegelfläche nicht größer als α_0 sind, wobei :

$$\alpha_0 = |\arcsin(\beta * NA)| + \frac{\alpha_{HOA}}{2}$$

- Hierbei ist β der Abbildungsmaßstab des Projektionsobjektives, NA die
- 30 bildseitige numerische Apertur und α_{HOA} der Winkel, der von einem senkrecht zur Objektebene und gegebenenfalls Bildebene verlaufenden

Teil der optischen Achse und einem Teil der optischen Achse im Bereich eines den Konkavspiegel tragenden Horizontalarms eingeschlossen wird.

- 5 Diese relativ niedrigen, maximalen Inzidenzwinkel sind insbesondere auch bei Ausführungsformen realisierbar, bei denen die erste Spiegelfläche in einem vom 45° abweichenden Neigungswinkel schräg zur optischen Achse des Projektionsobjektives angeordnet ist. Der Neigungswinkel kann beispielsweise bei 50° oder darüber, insbesondere
10 zwischen 50° und 55° liegen.

- Ferner wirkt die nahe hinter der ersten Spiegelfläche angeordnete positive Brechkraft durch einen im Vergleich zu bekannten Designs größeren Abstand zur Objektebene und damit durch größere
15 Randstrahlhöhen auf die Randstrahlen der Abbildung stärker brechend. Dies kann dazu genutzt werden, bei unveränderter Baugröße im Vergleich zu herkömmlichen Designs die der positiven Brechkraft folgenden optischen Komponenten, insbesondere die optischen Komponenten einer den Konkavspiegel umfassenden Spiegelgruppe,
20 mit verringertem Durchmesser zu konstruieren. Dies fördert eine materialsparende Konstruktion des katadioptrischen Objektivteils.

- Bevorzugte Ausführungsformen zeichnen sich dadurch aus, dass die Strahlumlenkeinrichtung eine zweite Spiegelfläche zur Umlenkung der
25 von dem Konkavspiegel kommenden Strahlung zum zweiten Objektivteil aufweist und dass das Randstrahl-Zwischenbild in der Nähe der zweiten Spiegelfläche angeordnet ist. Diese Nähe zur zweiten Spiegelfläche kann insbesondere so groß sein, dass die Randstrahlhöhe an der zweiten Spiegelfläche weniger als 20%, insbesondere weniger als 10%
30 des halben Durchmessers des Konkavspiegels beträgt. Das Randstrahl-Zwischenbild kann auch im wesentlichen auf die zweite Spiegelfläche fallen. Ein Randstrahl-Zwischenbild der Abbildung in unmittelbarer Nähe

der zweiten Spiegelfläche ist günstig für eine Minimierung des Lichtleitwertes des Objektivs und erleichtert damit die Korrektur von Abbildungsfehlern.

- 5 Sofern das Randstrahl-Zwischenbild nicht im wesentlichen auf der zweiten Spiegelfläche liegt, ist es bevorzugt, wenn das Randstrahl-Zwischenbild in Lichtlaufrichtung vor der zweiten Spiegelfläche liegt. Besonders bevorzugt sind Ausführungsformen, bei denen in der Nähe des Zwischenbildes, insbesondere zwischen dem Zwischenbild und der
- 10 zweiten Spiegelfläche, positive Brechkraft angeordnet ist. In Verbindung mit der positiven Brechkraft nahe hinter der ersten Spiegelfläche sind dabei weitgehend symmetrische Anordnungen möglich, bei denen eine Pupille in der Nähe des Konkavspiegels oder Hauptspiegels liegt. Der Abbildungsmaßstab β_M von der Objektebene bis zum Zwischenbild kann
- 15 dadurch nahe bei 1:1 eingestellt werden und insbesondere größer als ca. 0,95 sein. Eine bevorzugt durch eine einzelne Positivlinse bereitgestellte positive Brechkraft in Lichtlaufrichtung hinter dem Zwischenbild kann einer übermäßigen Divergenz von Hauptstrahlen nach dem Zwischenbild entgegenwirken. Dadurch können die
- 20 Durchmesser der dem Zwischenbild nachfolgenden Linsen des zweiten Objektivteils gering gehalten werden, was eine materialsparende Konstruktion dieses Objektivteils ermöglicht.

- Vorteilhafte Projektionsobjektive zeichnen sich dadurch aus, dass in
- 25 einem doppelt durchstrahlten Bereich des Projektionsobjektivs, insbesondere zwischen der Strahlumlenkeinrichtung und dem Konkavspiegel, mindestens eine Mehrbereichslinse angeordnet ist, die einen in einer ersten Durchtrittsrichtung durchstrahlten ersten Linsenbereich und einen in einer zweiten Durchtrittsrichtung
- 30 durchstrahlten zweiten Linsenbereich aufweist, wobei der erste Linsenbereich und der zweite Linsenbereich auf mindestens einer Seite der Linse einander nicht überlappen. Wenn sich auf mindestens einer

der beiden Linsenseiten die „footprints“ der Strahlwege nicht überlappen, erlaubt eine derartige Mehrbereichslinse, zwei unabhängig voneinander wirksame Linsen geometrisch an eine gemeinsame Stelle zu bringen. Es ist auch möglich, zwei unabhängig voneinander wirkende
5 Linsen körperlich als eine Linse, nämlich eine einstückige Mehrbereichslinse, aus einem Linsenrohling zu fertigen. Eine derartige Mehrbereichslinse ist von einer herkömmlichen doppelt durchtreten Linse deutlich zu unterscheiden, da bei einer Mehrbereichslinse diese Art deren optische Wirkung auf die unabhängig voneinander
10 durchtretenden Strahlen durch geeignete unabhängige Formgebung der brechenden Flächen der Linsenbereiche unabhängig von einander beeinflussbar ist. Alternativ kann am Ort einer einstückigen Mehrbereichslinse auch eine Linsenanordnung mit mindestens einer Halblinse oder Teillinse angeordnet sein, um die aneinander
15 vorbeilaufenden Strahlenbündel unabhängig voneinander zu beeinflussen.

Bei bevorzugten Projektionsobjektiven wird die unmittelbar hinter der ersten Spiegelfläche vorgesehene positive Brechkraft und die vor der
20 zweiten Spiegelfläche vorgesehene positive Brechkraft durch eine derartige Mehrbereichslinse bereitgestellt. Fertigungstechnische Vorteile lassen sich erzielen, wenn von den beiden Linsenflächen der Mehrbereichslinse (Eintrittsseite und Austrittsseite bzw. umgekehrt) nur eine Linsenfläche Bereiche unterschiedlicher Krümmung aufweist. Die
25 Fertigung kann dann so durchgeführt werden, dass zunächst die Linse in der Form einer der beiden Flächenteile vorgefertigt wird. Dies ist bevorzugt eine sphärische Form. Dieser Bereich hat dann bereits die vorgesehene Krümmung. Der andere Flächenteil kann dann durch gezielte Nachbearbeitung mit einer Krümmung versehen werden, die
30 sich von der Krümmung der Ausgangsfläche unterscheidet. Hierzu kann eine gegebenenfalls computernumerisch gesteuerte Politur verwendet werden, insbesondere mit Hilfe von Ionenstrahlen.

Eine signifikante Erweiterung des Designraumes ist dann erzielbar, wenn die Mehrbereichslinse mindestens eine Linsenfläche aufweist, die in mindestens einem Teilbereich asphärisch ist. Insbesondere kann bei
5 einer Linsenfläche mit Bereichen unterschiedlicher Krümmung vorgesehen sein, dass mindestens einer dieser Bereiche asphärisch ist. Dies schließt insbesondere die Möglichkeit ein, zwei oder mehr Teilbereiche einer Linsenfläche unterschiedlich zu asphärisieren. Dadurch können unterschiedliche Krümmungen der Linsenhälften in den
10 jeweiligen optischen Strahlengängen simuliert werden. Dabei ist es vorteilhaft, wenn zwei verschiedene Asphären von einer gemeinsamen sphärischen Grundform abgeleitet sind und sich von dieser durch unterschiedliche asphärische Abweichungen unterscheiden.

15 Projektionsobjektive der hier beschriebenen Art mit außeraxialem Objektfeld, einem katadioptrischen ersten Objektivteil und einem mit mindestens einem Umlenkspiegel arbeitenden geometrischen Strahlteiler sowie einem einzigen Konkavspiegel, einem Zwischenbild und einem bevorzugt refraktiven zweiten Objektivteil können mindestens
20 eine senkrecht zu einer optischen Achse liegende Ebene haben, in der ein erstes Strahlbündel, welches zum Konkavspiegel läuft und ein zweites Strahlbündel, welches vom Konkavspiegel zurückläuft, ohne gegenseitige Überlappung aneinander vorbeilaufen. Gemäß einem Aspekt der Erfindung ist im Bereich dieser in zwei Teilbereichen
25 unabhängig durchstrahlten Ebene mindestens eine Halblinse oder Teil-Linse angeordnet, welche eines der Strahlbündel bricht und von dem anderen Strahlbündel nicht berührt wird bzw. in dessen Strahlweg nicht hineinreicht. Dies ermöglicht neue Freiheitsgrade für das Design derartiger hochentwickelter Projektionsobjektive. In der Ebene können
30 zwei derartige Teil-Linsen angeordnet sein, die jeweils auf eins der aneinander vorbeilaufenden Strahlbündel unabhängig voneinander wirken. Fassungstechnisch günstig sind solche Ausführungsformen, bei

denen eine oder, sofern vorhanden, zwei Halblinsen auf einem transparenten, scheibenförmigen Träger befestigt sind, beispielsweise auf einer Linse oder einer planparallelen Platte. Die Befestigung kann beispielsweise durch Ansprengen oder Aufkitten bzw. Kleben erfolgen.

5 Der transparente Körper des Trägers kann entlang seines ringförmigen Randes in einer im wesentlichen ringförmigen Fassung montiert sein. Die in der separat durchlaufenen Ebene angeordneten Linsen sind bevorzugt im Bezug auf die optische Achse in diesem Bereich rotationssymmetrisch gekrümmt. Dadurch bleibt das System ein

10 zentriertes, optisches System, welches im Bezug auf Design und Herstellung vorteilhaft ist.

Günstig ist es, wenn eine Gruppe optischer Elemente, die den Konkavspiegel und eine oder mehrere doppelt durchlaufene Linsen

15 umfasst, einen Abbildungsmaßstab hat, der deutlich von 1 abweicht. Insbesondere kann dieser zwischen 0,5 und 0,95 oder zwischen 1,05 und 1,2 liegen. Dadurch wird erreicht, dass sich die Winkelverteilungen der beiden Strahlbündel, die im Bereich der Halblinsen oder der Mehrbereichslinse aneinander vorbeilaufen, signifikant unterscheiden.

20 Dies hat zur Folge, dass sogar relativ ähnliche Formen der separat durchlaufenen Linsenflächen unterschiedliche Effekte auf die Bildkorrektur haben.

Da bei bevorzugten Projektionsobjektiven eine zwischen Objektebene

25 und Konkavspiegel liegende positive Brechkraft weitgehend oder komplett hinter der ersten Spiegelfläche angeordnet sein kann, ist es möglich, das Projektionsobjektiv so aufzubauen, das zwischen der Objektebene und der ersten Spiegelfläche keine oder nur geringe Brechkraft angeordnet ist. In diesem Bereich kann beispielsweise nur

30 eine weitgehend planparallele Eintrittsplatte vorgesehen sein. Diese kann zwei Funktionen erfüllen. Einerseits kann ein mit einem Inertgas, beispielsweise Helium, gespülter Innenraum des Projektionsobjektives

gegen den ggf. mit einem anderen Gas, beispielsweise Stickstoff, gespülten Außenraum gedichtet werden. Ferner wird durch die plane Grenzfläche des Objektivs gegen das Umgebungsmedium die Abbildungsleistung des Projektionsobjektivs unempfindlicher gegen
5 Druckschwankungen. Hierfür ist im wesentlichen ein verringerter Beitrag der Petzval-Summe und damit der Druckabhängigkeit der Feldkrümmung verantwortlich. Der geometrische Raum zwischen Eintrittselement und erster Spiegelfläche kann frei von optischen Komponenten, insbesondere frei von Positivlinsen sein, was eine in
10 diesem Bereich kompakte Konstruktion ermöglicht.

Das erste optische Element ist bei bevorzugten Ausführungsformen durch eine Negativlinse gebildet. Wenn zwischen Objektebene und erster Spiegelfläche negative Brechkraft angeordnet ist, kann die bei
15 erfindungsgemäßen Projektionsobjektiven ohnehin geringe Winkelbelastung der ersten Spiegelfläche weiter reduziert werden. Zudem ist eine vignettierungsfreie Abbildung mit noch geringerem Aufwand möglich. Die Eintrittsseite der Negativlinse ist vorzugsweise weitgehend eben, um die beschriebenen Vorteile der Druckstabilisierung
20 nutzen zu können.

Um bei geringem Materialeinsatz eine gute monochromatische Korrektur bzw. eine hohe Abbildungsleistung und niedrigere Aberrationen bei sehr großer numerischer Apertur zu erreichen, können in einer
25 Ausführungsform eine oder mehrere asphärische Flächen vorgesehen sein. In der Regel ist eine größere Anzahl von Asphären vorgesehen, jedoch vorzugsweise nicht mehr als sieben. Dabei ist es besonders im Hinblick auf die Korrektur der sphärischen Aberration und von Koma zweckmäßig, wenn mindestens eine asphärische Fläche im Bereich
30 einer Blendenebene angeordnet ist. Hier ist eine besonders wirksame Korrektur dann gegeben, wenn für diese Fläche das Verhältnis zwischen der Randstrahlhöhe an der Fläche und dem Radius der Öffnung der

Blende zwischen ca. 0,8 und ca. 1,2 liegt. Die Randstrahlhöhe sollte also bei der asphärischen Fläche nahe der maximalen Randstrahlhöhe im Blendenbereich liegen.

- 5 Um eine wirksame Korrektur der Verzeichnung und sonstiger Feldaberrationen zu ermöglichen, ist es zweckmäßig, auch in Feldnähe mindestens eine asphärische Fläche vorgesehen. Bei einem Design mit Zwischenbild liegen feldnahe Bereiche in der Nähe der Objektebene, in der Nähe der Bildebene und in der Nähe des mindestens einen
- 10 Zwischenbildes. Diese feldnahen Flächen zeichnen sich bevorzugt dadurch aus, dass bei ihnen das Verhältnis zwischen Randstrahlhöhe an der Fläche und Radius der zugehörigen Systemblende kleiner als ca. 0,8 ist, vorzugsweise kleiner als 0,6.
- 15 Günstig ist es, wenn mindestens eine Asphäre in Feldnähe und mindestens eine Asphäre in der Nähe einer Systemblende angeordnet ist. Dadurch ist es möglich, für alle angesprochenen Abbildungsfehler eine ausreichende Korrektur bereitzustellen.
- 20 Da die erfindungsgemäßen Projektionsobjektive mindestens ein Zwischenbild aufweisen, ist zusätzlich zur Objektebene und Bildebene mindestens eine weitere Feldebene sowie zusätzlich zu einer Systemblende mindestens eine konjugierte Blendenebene vorhanden, so dass viele Freiheitsgrade für die Anbringung wirksamer Asphären
- 25 existieren.

- Die vorstehenden und weiteren Merkmale gehen außer aus den Ansprüchen auch aus der Beschreibung und den Zeichnungen hervor, wobei die einzelnen Merkmale jeweils für sich alleine oder zu mehreren
- 30 in Form von Unterkombinationen bei einer Ausführungsform der Erfindung und auf anderen Gebieten verwirklicht sein und vorteilhafte sowie für sich schutzfähige Ausführungen darstellen können. Es zeigen:

Fig. 1 eine Längsschnittdarstellung einer ersten Ausführungsform eines Projektionsobjektivs,

5 Fig. 2 eine Längsschnittdarstellung einer zweiten Ausführungsform eines Projektionsobjektivs,

Fig. 3 eine vergrößerte Ansicht des Bereichs der Strahlumlenkeinrichtung in Fig. 2,

10

Fig. 4 eine Längsschnittdarstellung einer dritten Ausführungsform eines Projektionsobjektivs,

15 Fig. 5 eine Längsschnittdarstellung einer vierten Ausführungsform eines Projektionsobjektivs,

Fig. 6 eine Längsschnittdarstellung einer fünften Ausführungsform eines Projektionsobjektivs,

20 Fig. 7 eine Längsschnittdarstellung einer sechsten Ausführungsform eines Projektionsobjektivs

Fig. 8 eine Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage.

25

Bei der folgenden Beschreibung bevorzugter Ausführungsformen bezeichnet der Begriff "optische Achse" eine gerade Linie oder eine Folge von geraden Linienabschnitten durch die Krümmungsmittelpunkte der optischen Komponenten. Die optische Achse wird an

30 Umlenkspiegeln oder anderen reflektierenden Flächen gefaltet. Richtung und Abstände werden als „bildseitig“ beschrieben, wenn sie in Richtung der Bildebene bzw. des dort befindlichen, zu belichtenden Substrates

- gerichtet sind und als "objektseitig", wenn sie in Bezug auf die optische Achse zum Objekt gerichtet sind. Das Objekt ist in den Beispielen eine Maske (Retikel) mit dem Muster einer integrierten Schaltung, es kann sich aber auch um ein anderes Muster, beispielsweise eines Gitters, handeln. Das Bild wird in den Beispielen auf einem als Substrat dienenden, mit einer Photoresistschicht versehenen Wafer gebildet, jedoch sind auch andere Substrate, beispielsweise Elemente für Flüssigkeitskristallanzeigen oder Substrate für optische Gitter möglich.
- 10 Im folgenden werden identische oder einander entsprechende Merkmale der verschiedenen Ausführungsformen aus Gründen der Übersichtlichkeit mit den gleichen Bezugszeichen bezeichnet.

- Ein typischer Aufbau einer Variante eines erfindungsgemäßen katadioptrischen Reduktionsobjektivs 1 ist anhand eines ersten Ausführungsbeispiels in Figur 1 gezeigt. Es dient dazu, ein in einer Objektebene 2 angeordnetes Muster eines Retikels o. dgl. unter Erzeugung eines einzigen reellen Zwischenbildes 3 in eine parallel zur Objektebene 2 liegende Bildebene 4 in reduziertem Maßstab abzubilden, beispielsweise im Verhältnis 4:1. Das Objektiv 1 hat zwischen der Objektebene 2 und der Bildebene 3 einen katadioptrischen ersten Objektivteil 5 mit einem Konkavspiegel 6 und einer Strahlumlenkeinrichtung 7, und hinter der Strahlumlenkeinrichtung einen dioptrischen zweiten Objektivteil 8, der ausschließlich refraktive optische Komponenten enthält. Die Strahlumlenkeinrichtung 7 ist als Spiegelprisma ausgebildet und hat eine erste, ebene Spiegelfläche 9 zur Umlenkung der von der Objektebene 2 kommenden Strahlung in Richtung des Konkavspiegels, sowie eine im rechten Winkel zur ersten Spiegelfläche angeordnete, ebene zweite Spiegelfläche 10 zur Umlenkung der vom abbildenden Konkavspiegel 6 reflektierten Strahlung in Richtung des zweiten Objektivteils 8. Während die erste Spiegelfläche 9 für die Strahlumlenkung zum Konkavspiegel 6

notwendig ist, kann die zweite Spiegelfläche 10 auch entfallen. Dann würden, ohne weitere Umlenkspiegel, die Objektebene und die Bildebene im wesentlichen senkrecht zueinander stehen. Es kann auch eine Faltung innerhalb des refraktiven Objektivteils 8 vorgesehen sein.

5

Wie in Figur 1 erkennbar, tritt das Licht aus einem (nicht gezeigten) Beleuchtungssystem auf der bildabgewandten Seite der Objektebene 2 in das Projektionsobjektiv ein und durchtritt zunächst die in der Bildebene angeordnete Maske. Das transmittierte Licht durchtritt dann
10 eine zwischen der Objektebene 2 und der Strahlumlenkeinrichtung 7 angeordnete planparallele Platte 11 und wird dann von dem Faltungsspiegel 9 des Strahlteilers 7 in Richtung einer Spiegelgruppe 12 umgelenkt. Diese umfasst den Konkavspiegel 6 sowie zwei diesem unmittelbar vorangestellte Negativlinsen 13, 14, deren Flächen jeweils
15 zum Spiegel 6 konvex sind. Der Faltungsspiegel 9 ist derart in einem von 45° abweichenden Winkel zur optischen Achse 15 des vorausgehenden Objektivteiles ausgerichtet, dass die Umlenkung in einem Umlenkwinkel von mehr als 90°, im Beispiel ca. 103° bis 105°, erfolgt. Das vom Konkavspiegel 6 reflektierte und durch die zweifach
20 durchlaufenen Negativlinsen 13, 14 zur Strahlumlenkeinrichtung 7 zurückgeführte Licht wird vom zweiten Faltungsspiegel 10 der Strahlumlenkeinrichtung 7 in Richtung des dioptrischen zweiten Objektivteils 8 umgelenkt. Dabei wird in der Nähe des zweiten Faltungsspiegels 10 in Lichtlaufrichtung vor diesem das reelle
25 Zwischenbild 3 erzeugt. Die optische Achse 16 des zweiten Objektivteils 8 verläuft parallel zur optischen Achse 15 des Eingangsteils und erlaubt somit eine parallele Anordnung zwischen Objektebene 2 und Bildebene 4, was einen einfachen Scannerbetrieb ermöglicht.

30 Der katadioptrische erste Objektivteil 5 hat als eine Besonderheit eine bikonvexe Positivlinse 20, die in unmittelbarer Nähe der Strahlumlenkeinrichtung 7 angeordnet ist und sowohl im Lichtweg

zwischen erster Spiegelfläche 9 und Konkavspiegel 6 als auch im Lichtweg zwischen Konkavspiegel 6 und zweiter Spiegelfläche 10 positive Brechkraft in unmittelbarer Nähe der Spiegelflächen 9, 10 bereitstellt. Die bei dieser Ausführungsform doppelt-sphärische

5 Positivlinse 20 wird als Mehrbereichslinse genutzt, wobei der auf dem Hinweg zum Konkavspiegel 6 genutzte erste Linsenbereich 30 und der auf dem Lichtweg zum zweiten Spiegel 10 genutzte zweite Linsenbereich 31 einander nicht überlappen. Die durch die Linsenbereiche 30, 31 bereitgestellte Brechkraft kann prinzipiell auch

10 durch gesonderte, von einander unabhängige Linsen bereitgestellt werden.

Die Linsen des zweiten Objektivteils 8 können funktional in eine Transfergruppe 41 und eine Fokussiergruppe 42 unterteilt werden und

15 dienen gemeinsam dazu, das vor der zweiten Spiegelfläche 10 entstehende Zwischenbild 3 in die Bildebene 4 abzubilden. Die dem Zwischenbild nächste Linse 43 ist als Positiv-Meniskuslinse mit objektwärts gekrümmten Flächen ausgebildet. Dieser folgt eine entgegengerichtet gekrümmte Meniskuslinse 44 mit schwach negativer

20 Brechkraft. Mit größerem Abstand folgt eine Negativ-Meniskuslinse 45 mit objektwärts gekrümmten Flächen, gefolgt von einer bikonvexen Positivlinse 46 als letzter Linse der Transfergruppe 41. Dieser folgt mit größerem Abstand als erste Linse der Fokussiergruppe 42 eine Negativ-Meniskuslinse 47 mit objektwärts gekrümmten Flächen, gefolgt von

25 einer bikonvexen Positivlinse 48, einer weiteren objektwärts gekrümmten Negativ-Meniskuslinse 49 und einer weiteren bikonvexen Positivlinse 50. In einem nachfolgenden größerem Luftraum liegt die frei zugängliche Systemblende 60. Dieser folgt eine bikonvexe Positivlinse 51, eine bikonkave Negativlinse 52, zwei Positiv-Meniskuslinsen 54, 55

30 mit objektwärts gekrümmten Flächen und eine bikonvexe Positivlinse 56. Das Objektiv wird durch eine im wesentlichen planparallele

Abschlussplatte 57 abgeschlossen, der in einem bildseitigen Arbeitsabstand von ca. 8mm die Bildebene 4 folgt.

In Tabelle 1 ist die Spezifikation des Designs in tabellarischer Form
 5 zusammengefasst. Dabel gibt Spalte 1 die Nummer der brechenden, reflektierenden oder auf andere Weise ausgezeichneten Fläche F, Spalte 2 den Radius r der Fläche (in mm) und Spalte 3 den als Dicke bezeichneten Abstand d der Fläche zur nachfolgenden Fläche (in mm), Spalte 4 den als Index bezeichneten Brechungsindex des Materials des
 10 Bauelementes, das der Eintrittsfläche folgt, an. In Spalte 5 sind die reflektierenden Flächen gekennzeichnet, Spalte 6 gibt die optisch nutzbaren freien Durchmesser D der optischen Komponenten in mm an. Die Gesamtlänge L des Objektivs zwischen Objekt- und Bildebene beträgt ca. 1230 mm.

15 Bei der Ausführungsform sind sieben der Flächen, nämlich die Flächen F9 bzw. F15, F23, F27, F30, F34, F41 und F49 asphärisch. Die Asphären sind in der Zeichnungsfigur durch Doppelstriche gekennzeichnet. Tabelle 2 gibt die entsprechenden Asphärendaten an,
 20 wobei sich die Pfeilhöhen der asphärischen Flächen nach folgender Vorschrift berechnen:

$$p(h)=[((1/r)h^2)/(1+\text{SQRT}(1-(1+K)(1/r)^2h^2))]+C1*h^4+C2*h^6+....$$

25 Dabei gibt der Kehrwert (1/r) des Radius die Flächenkrümmung im Flächenscheitel und h den Abstand eines Flächenpunktes von der optischen Achse an. Somit gibt p(h) diese Pfeilhöhe, d. h. den Abstand des Flächenpunktes vom Flächenscheitel in z-Richtung, d. h. in Richtung der optischen Achse. Die Konstanten K, C1, C2 ... sind in
 30 Tabelle 2 wiedergegeben.

Das mit Hilfe dieser Angaben reproduzierbare optische System 1 ist für eine Arbeitswellenlänge von ca. 157 nm ausgelegt, bei der das für alle Linsen verwendete Linsenmaterial Kalziumfluorid einen Brechungsindex $n = 1,55841$ hat. Die bildseitige numerische Apertur NA beträgt 0,85, der
5 Abbildungsmaßstab 4:1. Das System ist für ein Bildfeld der Größe 26 x 5,5 mm² ausgelegt. Das System ist doppelt telezentrisch.

Im folgenden werden die Funktion des optischen Systems und einige vorteilhafte Besonderheiten näher erläutert. Da zwischen der
10 Objektebene 2 und der ersten Faltung 9 keine Brechkraft liegt, entsprechen die am Faltungsspiegel 9 auftretenden Winkel zwischen der optischen Achse 15 und dem Hauptstrahl bzw. dem Randstrahl genau den entsprechenden Strahlwinkeln in der Objektebene 2. Die Faltung des Strahlengangs am ersten Umlenkspiegel 9 um mehr als 90° ist
15 günstig für einen großen Arbeitsabstand über die gesamte Breite des Objektivs. Die im Lichtweg hinter der ersten Spiegelfläche 9 zwischen dieser und dem Konkavspiegel 6 angeordnete Positivlinse 20 ist in einem optischen Nahbereich der Objektebene 2 angeordnet, in welchem die Hauptstrahlhöhe des äußersten Feldpunktes der Abbildung größer
20 ist als die Randstrahlhöhe. Als Hauptstrahlhöhe wird hier die Strahlhöhe eines Feldrandstrahles bezeichnet, der im Bereich der Pupille die optische Achse kreuzt. Als Randstrahlhöhe wird die Strahlhöhe eines Feldmittenstrahles bezeichnet, der zum Rand der Systemapertur führt. Die unmittelbar hinter dem ersten Faltungsspiegel angeordnete positive
25 Brechkraft bewirkt in Verbindung mit der verschwindenden Brechkraft zwischen Objektebene und erstem Faltungsspiegel, dass bei objektseitiger Telezentrie die Hauptstrahlen der Abbildung achsparallel auf die erste Spiegelfläche 9 fallen. Dies führt im Vergleich zu Designs, bei denen positive Brechkraft vor dem ersten Faltungsspiegel 9
30 angeordnet ist, zu deutlich kleineren Inzidenzwinkeln der auf die erste Spiegelfläche 9 auftreffenden Strahlung. Diese Inzidenzwinkel sind bei der gezeigten Ausführungsform nicht größer als ca. 68°, wobei ein

maximaler Inzidenzwinkel von ca. 66° vorliegt. Die relativ kleinen maximalen Inzidenzwinkel ermöglichen es, mit Hilfe relativ einfach aufgebauter Reflexbeschichtungen für die Spiegelfläche 9 eine über die gesamte Winkelbandbreite weitgehend gleichmäßige Reflexion am Faltungsspiegel 9 zu erreichen. Ferner wirkt die Positivlinse 20 aufgrund eines relativ großen Abstandes zur Objektebene 2 und damit größerer Randstrahlhöhe auf die Randstrahlen der Abbildung stärker brechend. Dadurch kann der Durchmesser der Spiegelgruppe 12 und insbesondere des Konkavspiegels 6 klein gehalten werden, was fertigungstechnische und konstruktive Vorteile bringt. Wenn objektseitige Telezentrie nicht erforderlich oder gewünscht ist, kann die Brechkraft der im Nahbereich der Objektebene angeordneten Positivlinse 20 entsprechend reduziert werden, was auch die Inzidenzwinkel am ersten Spiegel 9 beeinflusst.

15

Die beiden negativen Meniskuslinsen 13, 14 unmittelbar vor dem Konkavspiegel 6 sorgen für die Korrektur der chromatischen Längsaberration CHL.

20 Eine weitere Besonderheit besteht darin, dass auch im Lichtweg zwischen dem Konkavspiegel 6 und der zweiten Spiegelfläche 10 in unmittelbarer Nähe der Spiegelfläche positive Brechkraft angeordnet ist. Diese wird ebenfalls durch die Positivlinse 20 bereitgestellt. Die vor dem zweiten Faltungsspiegel 10 angeordnete positive Brechkraft kollimiert annähernd den Hauptstrahl und ermöglicht es damit, die nachfolgenden Linsen des dioptrischen Objektivteils 8 mit relativ kleinen Durchmessern zu fertigen, wodurch ein materialsparendes Design gefördert wird.

Die Brechkräfte des unmittelbar hinter dem ersten Faltungsspiegel 9 durchstrahlten Linsenbereichs der Positivlinse 20 und der Spiegelgruppe 12 sind so bemessen, dass das reelle Zwischenbild 3 der Abbildung in der Nähe der zweiten Spiegelfläche 10 angeordnet ist. Genauer liegt

das paraxiale Zwischenbild 25 im wesentlichen auf der der Strahlumlenkungseinrichtung 7 abgewandten Linsenfläche 26 der Positivlinse 20, also im Lichtweg zwischen Konkavspiegel 6 und Faltungsspiegel 10 auf der Eintrittsseite der Positivlinse 20, während das
5 Randstrahl-Zwischenbild näher an der zweiten Spiegelfläche, jedoch vor dieser, liegt. Das Zwischenbild liegt also bevorzugt vor der zweiten Spiegelfläche 10, und zwar insbesondere so, dass zwischen dem paraxialen Zwischenbild und dieser zweiten Spiegelfläche noch positive Brechkraft angeordnet ist. Da das Zwischenbild in die Nähe des zweiten
10 Faltungsspiegels 10 fällt, kann der Lichtleitwert des gesamten Projektionsobjektivs bei konstanter Feldgröße minimiert werden. Die weitgehende Symmetrie der Anordnung, bei welcher die Pupille in der Nähe des Hauptspiegels 6 liegt, bedingt, dass der Abbildungsmaßstab β_M des katadioptrischen ersten Objektivteils nahe bei 1:1 und generell
15 oberhalb von ca. 0,95 liegt.

Die gleichzeitige Realisierung dieser Besonderheiten wird bei der gezeigten Ausführungsform dadurch erleichtert, dass die in unmittelbarer Nähe der Spiegelflächen 9, 10 vorgesehene positive
20 Brechkraft, welche einerseits im Lichtweg zwischen erster Spiegelfläche 9 und Konkavspiegel und andererseits im Lichtweg zwischen Konkavspiegel 6 und zweiter Spiegelfläche 10 wirkt, durch eine einzige, einstückige Mehrbereichslinse, nämlich die Positivlinse 20 bereitgestellt wird. Sie hat einen ersten Linsenbereich 30, der auf dem Weg vom
25 ersten Faltungsspiegel 9 zum Konkavspiegel 6 durchstrahlt wird, und einen zweiten Linsebereich 31, der auf dem Lichtweg vom Konkavspiegel 6 zum zweiten Faltungsspiegel 10 durchstrahlt wird. Die Linsenbereiche 30, 31 überlappen einander weder auf der den Faltungsspiegeln 9, 10 zugewandten Seite noch auf der der
30 Spiegelgruppe 12 zugewandten Seite, so dass die Linsenbereiche völlig unabhängig voneinander genutzt werden. Entsprechend kann die optische Wirkung der Linsenbereich 30, 31 auch durch separate Linsen

erzielt werden. Die Vereinigung in einer einzigen Linse erleichtert jedoch die Konstruktion des Objektivs.

Eine Besonderheit des refraktiven zweiten Objektivteils 8 besteht darin,
5 dass mindestens eine Negativ-Positiv-Linsengruppe vorhanden ist, bei der zwischen der Negativlinse und der nachfolgenden Positivlinse ein zerstreuer Luftraum angeordnet ist, der insbesondere die geometrische Form einer Konvex-Konkav-Linse haben kann. Besonders günstig sind derartige Linsenfolgen nahe der Blende. Im Beispiel gemäß
10 Fig. 1 sind vor der Blende 60 zwei derartige Linsengruppen 47, 48 bzw. 49, 50 vorhanden, bei denen einer Linse 47 bzw. 49 mit bildseitiger Konkavfläche ein meniskusförmiger Laufraum folgt.

Für die Ausführungsform eines Projektionsobjektives 100 gemäß Fig. 2
15 ist die Spezifikation in den Tabellen 3 und 4 angegeben. Die Nummerierung der optischen Elemente bzw. Baugruppen entspricht der Nummerierung der Ausführungsform gemäß Fig. 1.

Ein wesentlicher Unterschied zur Ausführungsform gemäß Fig. 1 besteht
20 darin, dass die in unmittelbarer Nähe der Faltungsspiegel 9, 10 angeordnete Mehrbereichlinse 120 positiver Brechkraft als „geteilte“ Linse konstruiert ist. Zur Verdeutlichung ist der Bereich, der die Strahlumlenkeinrichtung 7 und die Mehrbereichlinse 120 umfasst, in Fig. 3 vergrößert schematisch dargestellt. Bei der Mehrbereichlinse 120
25 ist die den Faltungsspiegeln 9, 10 zugewandte und in diese Richtung gekrümmte Linsenfläche 121 physikalisch derart geteilt, dass der dem ersten Faltungsspiegel 9 zugeordnete Linsenbereich 130 eine andere positive Brechkraft hat, als der dem zweiten Faltungsspiegel 10 zugeordnete Linsenbereich 131. Dies wird durch unterschiedliche
30 Krümmungen der Eintrittsfläche 123 und der Austrittsfläche 124 bewirkt. Derartige Mehrbereichslinsen unterschiedlicher Brechkraft vergrößern den Designspielraum für derartige Projektionsobjektive.

Um die Fertigung einer derartigen, geteilten Linse zu erleichtern, ist bei einem bevorzugten Fertigungsverfahren vorgesehen, die Linse 120 aus einem einzigen Rohling herzustellen. Dabei sollen die beiden

5 Flächenteile 123, 124 gegeneinander eine geringe Deformation aufweisen. Dies kann auf einfache Weise dadurch erreicht werden, dass zunächst die als geteilte Fläche 121 vorgesehene Fläche in der Form einer der beiden Flächenteile in an sich bekannter Weise vorgefertigt wird. Dann wird der Flächenanteil, für den eine von dieser Flächenform

10 abweichende Flächenform vorgesehen ist, durch gezielte Politur aus dem ersten Flächenanteil herausgearbeitet. Vorzugsweise ist hierzu eine Oberflächenformgebung mit Hilfe von Ionenstrahlen vorgesehen. Die Bearbeitungszeit ist dabei dem notwendigen Volumenabtrag im wesentlich proportional. Bei der in Fig. 2 gezeigten Ausführungsform ist

15 der Flächenteil 124 asphärisiert, während der Flächenteil 123 sphärisch ist. Durch die Asphärisierung können unterschiedliche Durchbiegungen der Linsenbereiche 130, 131 in den jeweiligen, von einander getrennten optischen Strahlengängen simuliert werden. Dadurch ist eine signifikante Erweiterung des Designraums möglich.

20

Die in den Fign. 1 und 2 gezeigten Ausführungsformen haben als erstes optisches Element 11 eine Planparallelplatte. Diese erfüllt mindestens zwei wichtige Funktionen. Zunächst kann der bei den Beispielobjektiven mit Helium gespülte Innenraum des Projektionsobjektives gegen den

25 Außenraum abgedichtet werden, der beispielsweise mit Stickstoff gespült sein kann. Ferner wird durch die plane äußere Grenzfläche des Objektivs gegenüber dem Umgebungsmedium das Design gegen Druckschwankungen deutlich unempfindlicher. Dies ist im wesentlichen auf einen verringerten Beitrag der Pezval-Summe und damit der

30 Druckabhängigkeit der Feldkrümmung zurückzuführen.

Für die Ausführungsform eines Projektionsobjektivs 200 gemäß Fig. 4 ist die Spezifikation in den Tabellen 5 und 6 angegeben. Die Nummerierung der optischen Elemente bzw. der optischen Baugruppen entspricht der Nummerierung bei den vorhergehenden Ausführungsformen.

Ein wesentlicher Unterschied zu den obigen Ausführungsformen besteht darin, dass hier zwischen der Objektebene 2 und der ersten Spiegelfläche 9 eine negative Brechkraft vorgesehen ist. Diese wird durch eine Negativlinse 211 bereitgestellt, die eine ebene Eintrittsfläche und eine zur Objektebene gekrümmte, konkave Austrittsfläche hat. Die dadurch bereitgestellte negative Brechkraft verringert im Vergleich zu den obigen Ausführungsformen nochmals die Winkelbelastung auf dem ersten Faltungsspiegel 9 und gestaltet die Vignettierungsproblematik des Designs günstig. Da die Eintrittsfläche eben ist, bleiben alle Vorteile ebener Eintrittsflächen bezüglich Druckstabilisierung erhalten. Der maximale Inzidenzwinkel kann beispielsweise im Vergleich zur Ausführungsform gemäß Fig. 1 um ca. $0,3^\circ$ reduziert werden. Die Designmodifikation zeichnet sich außerdem dadurch aus, dass hier das paraxiale Zwischenbild 225 mit deutlichem Abstand vor der dem Hauptspiegel 6 zugewandten Linsenfläche der Mehrbereichslinse 220 liegt.

In Fig. 5 ist eine Ausführungsform eines Projektionsobjektives 300 gezeigt, dessen Spezifikation in den Tabellen 7 und 8 angegeben ist. Diese Designmodifikation hat, wie die Ausführungsform gemäß Fig. 1, ein planparalleles Eintrittselement 311 und eine nahe der Strahlumlenkeinrichtung 7 angeordnete, doppelt sphärische Mehrbereichslinse 320, welche bei anderen Ausführungsformen auch mindestens teilweise als asphärische Linse ausgebildet sein kann. Eine Besonderheit des Designs liegt darin, dass hier sowohl das leicht erkennbare Randstrahl-Zwischenbild 326, als auch das näher am

Konkavspiegel angeordnete, paraxiale Zwischenbild (nicht gezeigt) mit deutlichem Abstand außerhalb der Mehrbereichslinse 320 zwischen dieser und dem Konkavspiegel angeordnet ist. Somit liegt das gesamte Zwischenbild außerhalb von optischem Material. Auf beiden Seiten der

5 Mehrbereichslinse 320 überlappen sich die footprints der Strahlengänge nicht. Diese Lage des Zwischenbildes vollständig außerhalb von optischem Material auf der der Strahlumlenkeinrichtung abgewandten Seite der Mehrbereichslinse kann insbesondere dann vorteilhaft sein, wenn für die Mehrbereichslinse 320 kein optisches Material hoher Güte,

10 insbesondere großer Materialhomogenität, verwendet werden soll oder kann, weil beispielsweise solches Material nicht verfügbar oder zu teuer ist. Denn es kann vermieden werden, dass eventuell vorhandene Defekte innerhalb des Linsenmaterials in die Bildebene abgebildet werden. Das Design stellt höhere Anforderungen an

15 Korrekturmaßnahmen, da diese Lage des Zwischenbildes einer sphärischen Unterkorrektur entspricht, die einer natürlichen Tendenz derartiger Systeme zur sphärischen Überkorrektur entgegengesetzt ist. Die Unterkorrektur des Zwischenbildes wird hier vornehmlich durch geeignete Form einer Asphäre in der Spiegelgruppe bewirkt.

20

An Hand Fig. 6 wird erkennbar, dass viele der hier beschriebenen Vorteile unabhängig davon nutzbar sind, welche Faltungsgeometrie mit Hilfe der Strahlumlenkeinrichtung und gegebenenfalls weiterer

Spiegelflächen eingestellt wird. Das Design in Fig. 6 ist aus dem in Fig.

25 1 gezeigten Design abgeleitet, wobei die Formen der Linsen erhalten bleiben. Entsprechende Elemente werden daher mit gleichen Bezugszeichen bezeichnet. Die Ausführungsform des Projektionsobjektivs 1' in Fig. 6 zeichnet sich dadurch aus, dass das von der Objektebene 2 kommende Licht nach Durchtritt durch die

30 planparallele Eintrittsplatte 11 und die in zwei Strahlrichtungen genutzte Positivlinse 20 zunächst auf den Konkavspiegel 6 trifft, um von diesem in Richtung der ersten Spiegelfläche 9 der Strahlumlenkeinrichtung 7

reflektiert zu werden. Zwischen der nachfolgenden Transfergruppe 41 und der dieser folgenden Fokussiergruppe 42 ist ein Umlenkspiegel 59 angeordnet, um eine parallele Ausrichtung von Objektebene und Bildebene zu ermöglichen. Das Zwischenbild 3 liegt hier vor der ersten
5 Spiegelfläche 9, wobei das (nicht gezeigte) paraxiale Zwischenbild auf der dem Konkavspiegel 6 zugewandten Eintrittsfläche der Positivlinse 20 und das Randstrahl-Zwischenbild zwischen dieser und dem Umlenkspiegel 9 liegt. Es ist erkennbar, dass im Raum zwischen der Eintrittsplatte 11 und dem Umlenkspiegel 9 keine optische Komponente
10 angeordnet ist, so dass zwischen Objektebene und Strahlumlenkeinrichtung 7 eine kompakte, axiale gedrungene Bauform möglich ist. Erkennbar ist auch, dass die der Strahlumlenkeinrichtung 7 zugewandte, sphärische Linsenfläche der Positivlinse 20 von dem zwischen Objektebene und Konkavspiegel laufenden Lichtbündel und
15 dem zwischen Konkavspiegel und erster Spiegelfläche 9 laufenden Bündel unabhängig genutzt wird, da die Strahlbündel auf dieser Seite nicht überlappen. Durch geeignete, von einander abweichende Formgebung der den Strahlbündeln zugeordneten Linsenbereiche 30, 31 lässt sich also mit der einstückigen Mehrbereichslinse 20 die optische
20 Wirkung von zwei unabhängigen Linsen mit verschiedenen Durchbiegungen simulieren.

Fig. 7 zeigt eine katadioptrisches Projektionsobjektiv 400, welches ein in der Objektebene 2 liegendes, außeraxiales Objektfeld über ein nicht-
25 korrigiertes Zwischenbild 3 in ein in der Bildebene 4 angeordnetes, rechteckiges Bildfeld der Größe 26mm x 8mm in einem Reduktionsmaßstab von 4:1 bei einer bildseitigen numerischen Apertur $NA=0,80$ abbildet. Die Wellenfrontkorrektur im Bildfeld ist ungefähr 1% r.m.s. der Wellenlänge (157nm) über das gesamte Feld.

30

Das Zwischenbild 3 wird durch einen katadioptrischen, ersten Objektivteil 5 mit einem geometrischen Strahlteiler 7 erzeugt, wobei die

erste Spiegelfläche 9 eine reflektierende Rückseite eines Prismas 401 ist. Die nahe beim Konkavspiegel 6 angeordnete Gruppe zweier Negativlinsen wird zweifach durchlaufen. Die zweite Spiegelfläche 10 der Strahlumlenkeinrichtung ist nahe dem Zwischenbild angeordnet. Der
5 nachfolgende, refraktive zweite Objektivteil 8 hat eine Blendenebene 402 und ist nach bekannten Techniken konstruiert. Asphärische Linsenflächen dienen der Reduktion der Anzahl von Linsen im Hinblick auf die Anforderungen nach hoher NA und die Transmissionsprobleme bei 157nm sowie die Verfügbarkeit und den Preis von
10 Kalziumfluoridlinsen. Durch die Negativlinsen der Spiegelgruppe 12 wird ein Vorhalt für den axialen Farbfehler und den Anstieg der Petzval-Summe geschaffen, welche durch die Positivilinsen eingeführt werden.

Die optische Achse 15 am Objektfeld und die optische Achse 16 im
15 refraktiven zweiten Objektivteil 8 sind parallel, um eine Parallelstellung von Objektebene und Bildebene zu erreichen. Zusätzlich sind sie koaxial oder nur leicht seitlich gegeneinander versetzt. Die optische Achse 17 des Teils zwischen den Faltungsspiegeln 9, 10 und dem Konkavspiegel weicht davon in einem optimierten Winkel ab, um eine
20 vignettierungsfreie Anordnung der Faltungsspiegel 9, 10 zu ermöglichen. Andere Faltungsvarianten sind im Rahmen des Designs ebenfalls möglich, beispielsweise eine h-Faltung entsprechend Fig. 6.

Zwischen der Strahlumlenkeinrichtung 7 mit den Faltungsspiegeln 9, 10
25 und dem Konkavspiegel 6 liegt in der Nähe der Strahlumlenkeinrichtung ein axialer Bereich 404, in welchem das Strahlbündel, welches vom Objektfeld zum Konkavspiegel läuft, und das Strahlbündel, welches vom Konkavspiegel zurück zum Zwischenbild 3 läuft, separat voneinander laufen und einander nicht überlappen. Dies ist eine Konsequenz der
30 geometrischen Strahlteilung im Gegensatz zur physikalischen Strahlteilung bei anderen Typen katadioptrischer Projektionsobjektive. In dem von zwei aneinander vorbeilaufenden Lichtbündeln separat

durchlaufenen Bereich 404 sind zwei Halblinsen oder Teil-Linsen 405, 406 angeordnet, die eine Besonderheit dieses Designs darstellen. Die Halblinsen 405, 406 haben jeweils positive Brechkraft, wodurch der Durchmesser des Strahlbündels im Bereich der Spiegelgruppe 12 klein
5 gehalten wird. Außerdem wird die Aufteilung der Strahlbündel bei den Umlenkspiegeln 9, 10 vereinfacht und die außeraxiale Abweichung des Objektfeldes kann reduziert werden. Die Brechkraft der nahe der Objektebene angeordneten Positiv-Halblinse 405 beeinflusst die objektseitige Telezentrie, so dass durch geeignete Wahl der Brechkraft
10 telezentrische und nicht-telezentrische Varianten möglich sind. Gegebenenfalls kann die Halblinse 405, d.h. die positive Brechkraft zwischen Objektebene und Konkavspiegel, auch entfallen.

Beide Halblinsen 405 und 406 haben brechende Oberflächen, die in
15 Bezug auf die optische Achse 17 des zum Konkavspiegel führenden Objektivteils rotationssymmetrisch sind. Entsprechend ist das ganze Projektionsobjektiv ein zentriertes, optisches System.

Bei der zwischen dem ersten Spiegel 9 und dem Konkavspiegel 6
20 angeordneten ersten Halblinse 405 ist die Fläche mit der stärkeren Krümmung dem Objektfeld zugewandt, während die zweite Halblinse 406 ihre stärker gekrümmte Linsenfläche auf der dem der zweiten Spiegelfläche 10 abgewandten und dem Konkavspiegel 6 zugewandten Seite hat. Es sind also jeweils die Strahleintrittsflächen stärker gekrümmt
25 als die Strahlaustrittsflächen. Die Strahldivergenz bei der zweiten Halblinse 406 ist größer als bei der ersten Halblinse 405, da die Kombination des Konkavspiegels 6 und der vorgeschalteten Negativlinsen einen verkleinernden Abbildungsmaßstab hat. Dementsprechend haben die Halblinsen 405, 406 unterschiedliche
30 korrigierende Einflüsse auf die Abbildung. Dies kann durch eine einzige rotationssymmetrische Linse an Stelle der beiden Halblinsen nicht erreicht werden.

- Bei diesem Design ist eine Feldlinse zwischen der Objektebene 2 und der ersten Spiegelfläche 9 optional. Die Strahlteilung und Faltung kann durch ebene Umlenkspiegel oder durch Rückflächen von Prismen erreicht werden. Es ist sowohl eine telezentrische als auch eine
- 5 homozentrische Anordnung des Hauptstrahls möglich. Die Anordnung des Zwischenbildes 3 in der Nähe eines Faltungsspiegels ist vorteilhaft zur Verminderung oder Vermeidung von Vignettierung. Wenn nur eine Linsenoberfläche für die zwei Strahlbündel verschieden ist, dann wird
- 10 hierfür bevorzugt die Seiten nahe des Objektfeld bzw. nahe dem Zwischenbild gewählt, um stärkeren Einfluss auf feldspezifische Aberrationen zu erzielen. Durch die hier beschriebenen Maßnahmen können Vignettierungseffekte in einem Ausmaß reduziert werden, dass das Objektfeld in die Nähe der optischen Achse gerückt werden kann
- 15 mit der Konsequenz, dass der zu korrigierende Feldradius klein ist. Dies reduziert alle erforderlichen Linsendurchmesser, wodurch ein materialsparendes Design begünstigt wird. Die Korrektur von Bildfehlern wird durch die zusätzlichen Freiheitsgrade für das Design vereinfacht.
- 20 Bei den beschriebenen Ausführungsformen bestehen alle transparenten, optischen Komponenten aus dem gleichen Material, nämlich Calciumfluorid. Es können gegebenenfalls auch andere, bei der Arbeitswellenlänge transparente Materialien verwendet werden, insbesondere die eingangs erwähnten Fluoridkristallmaterialien.
- 25 Gegebenenfalls kann auch mindestens ein zweites Material eingesetzt werden, um beispielsweise die chromatische Korrektur zu unterstützen. Die Vorteile der Erfindung können selbstverständlich auch bei Systemen für andere Arbeitswellenlängen des Ultraviolettbereichs verwendet werden, beispielsweise für 248 nm oder 193 nm. Da bei den gezeigten
- 30 Ausführungsformen nur ein Linsenmaterial verwendet wird, ist eine Anpassung der gezeigten Designs auf andere Wellenlängen dem Fachmann besonders einfach möglich. Insbesondere bei Systemen für

größere Wellenlängen können auch andere Linsenmaterialien, beispielsweise synthetisches Quarzglas für alle oder einige optische Komponenten verwendet werden.

- 5 Es ist auch möglich, einige der beschriebenen Projektionsobjektive mit physikalischer Strahlteilung aufzubauen. Insbesondere kann die Strahlumlenkeinrichtung eine erste und eine zweite Spiegelfläche aufweisen, wobei die Spiegelflächen als polarisationsselektive Spiegelflächen ausgebildet sind, die geometrisch zusammenfallen
10 können. Die Spiegelflächen können z.B. in einem Strahlteilerblock (BSC) angeordnet sein.

- Erfindungsgemäße Projektionsobjektive können in allen geeigneten mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlagen eingesetzt
15 werden, beispielsweise in einem Waferstepper oder einem Waferscanner. In Fig. 8 ist beispielhaft ein Waferscanner 150 schematisch gezeigt. Er umfasst eine Laserlichtquelle 151 mit einer zugeordneten Einrichtung 152 zur Einengung der Bandbreite des Lasers. Ein Beleuchtungssystem 153 erzeugt ein großes, scharf
20 begrenztes und sehr homogen beleuchtetes Bildfeld, das an die Telezentrierfordernisse des nachgeschalteten Projektionsobjektives 1 angepasst ist. Das Beleuchtungssystem 153 hat Einrichtungen zur Auswahl des Beleuchtungsmodus und ist beispielsweise zwischen konventioneller Beleuchtung mit variablem Kohärenzgrad,
25 Ringfeldbeleuchtung und Dipol- oder Quadrupolbeleuchtung umschaltbar. Hinter dem Beleuchtungssystem ist eine Einrichtung 154 zum Halten und Manipulieren einer Maske 155 so angeordnet, dass die Maske 155 in der Bildebene 2 des Projektionsobjektivs 1 liegt und in dieser Ebene zum Scanbetrieb bewegbar ist. Entsprechend umfasst die
30 Einrichtung 154 im Fall des gezeigten Waferscanners den Scanantrieb.

Hinter der Maskenebene 2 folgt das Reduktionsobjektiv 1, das ein Bild der Maske in reduziertem Maßstab auf einem mit einer Photoresistschicht belegten Wafer 156 abbildet, der in der Bildebene 4 des Reduktionsobjektivs 1 angeordnet ist. Der Wafer 156 wird durch
5 eine Einrichtung 157 gehalten, die einen Scannerantrieb umfasst, um den Wafer synchron mit dem Retikel zu bewegen. Alle Systeme werden von einer Steuereinheit 158 gesteuert. Der Aufbau solcher Systeme sowie deren Arbeitsweise ist an sich bekannt und wird daher nicht mehr erläutert.

Tabelle 1

Fläche	Radius	Dicke	Index	Ref.	D
0	0,0000	36,0000			134,0
1	0,0000	0,0000			146,5
2	0,0000	10,0000	1,55841		146,5
3	0,0000	75,0000			148,7
4	0,0000	0,0000		REFL	202,3
5	0,0000	-15,0000			176,6
6	-344,5436	-24,6200	1,55841		187,3
7	4353,9901	-476,0730			187,7
8	250,8035	-15,0000	1,55841		219,5
9	899,5097	-27,7430			232,4
10	234,4913	-15,0000	1,55841		234,7
11	770,4531	-30,4280			259,5
12	258,9157	30,4280		REFL	264,4
13	770,4531	15,0000	1,55841		257,4
14	234,4913	27,7430			230,4
15	899,5097	15,0000	1,55841		227,2
16	250,8035	476,0730			213,1
17	0,0000	0,0000			141,0
18	4353,9901	24,6200	1,55841		140,9
19	-344,5436	-3,0000			139,9
20	0,0000	0,0000		REFL	155,4
21	0,0000	-119,0000			138,4
22	-267,8818	-30,0500	1,55841		177,2
23	-576,5334	-41,6440			176,8
24	267,9465	-30,0500	1,55841		180,1
25	273,9674	-93,7130			190,6
26	-496,4337	-30,0500	1,55841		212,6
27	-387,4885	-27,3640			211,3
28	-3333,8251	-30,0500	1,55841		215,5
29	454,1648	-256,5570			218,2
30	-629,8867	-10,0500	1,55841		224,1
31	-195,0941	-13,0000			220,9
32	-246,4630	-40,3280	1,55841		225,5
33	2288,9102	-1,3000			226,0
34	-300,8609	-10,0500	1,55841		226,4
35	-176,6095	-26,2730			219,5
36	-239,6605	-38,8460	1,55841		229,2
37	16311,7034	-23,1970			228,6
38	0,0000	7,1350			225,8
39	-253,1435	-56,9530	1,55841		229,5
40	330,6107	-8,5400			227,2

Tabelle 1 Fortsetzung

Fläche	Radius	Dicke	Index	Ref.	D
41	342,9067	-18,2840	1,55841		218,0
42	-165,1076	-14,6820			200,5
43	-222,6188	-49,8860	1,55841		203,4
44	348,3621	-1,3000			202,7
45	-143,5651	-37,2220	1,55841		180,6
46	-358,4291	-1,3000			167,9
47	-194,9258	-37,1660	1,55841		159,2
48	-1285,1182	-1,6400			137,5
49	-172,6577	-48,8030	1,55841		120,5
50	1719,9216	-1,2000			73,1
51	0,0000	-10,0000	1,55841		68,2
52	0,0000	-8,0000			56,0
53	0,0000	0,0000			33,5

Tabelle 2

Fläche	K	Asphären				
		C1	C2	C3	C4	C5
9	0,0000	1,0033E-08	-2,1576E-13	1,5293E-18	4,1306E-23	-9,0704E-27
15	0,0000	1,0033E-08	-2,1576E-13	1,5293E-18	4,1306E-23	-9,0704E-27
23	0,0000	-6,9855E-09	-5,6982E-14	3,5079E-19	-3,6907E-23	1,9575E-27
27	0,0000	-8,5198E-09	1,6320E-14	-3,1084E-19	2,2299E-23	-7,9900E-28
30	0,0000	3,7040E-09	-2,2096E-13	8,7668E-18	-1,2775E-22	1,3521E-26
34	0,0000	6,7737E-09	6,7716E-14	-3,9157E-18	1,7628E-22	-2,7036E-26
41	0,0000	1,7799E-08	-1,5023E-12	7,4806E-17	-2,8690E-21	7,4224E-26
49	0,0000	5,4176E-08	4,5781E-12	4,2158E-17	1,8517E-21	-2,8299E-24

Tabelle 3

Fläche	Radius	Dicke	Index	Ref.	D
0	0,0000	36,0000			134,0
1	0,0000	0,0000			146,5
2	0,0000	10,0000	1,55841		146,5
3	0,0000	75,0000			148,7
4	0,0000	0,0000		REFL	202,3
5	0,0000	-15,0000			176,6
6	-332,0908	-24,5940	1,55841		187,5
7	9972,9744	-476,9880			187,8
8	243,4102	-15,0000	1,55841		219,5
9	738,8948	-27,3440			232,6
10	227,7530	-15,0000	1,55841		234,9
11	727,1156	-29,7880			260,4
12	260,0106	29,7880		REFL	265,3
13	727,1156	15,0000	1,55841		258,4
14	227,7530	27,3440			230,2
15	738,8948	15,0000	1,55841		227,0
16	243,4102	476,9880			212,9
17	0,0000	0,0000			140,6
18	9972,9744	24,5940	1,55841		140,6
19	-324,8209	-3,0000			139,6
20	0,0000	0,0000		REFL	155,7
21	0,0000	-119,0000			138,2
22	-339,9996	-16,2900	1,55841		176,7
23	-688,1303	-24,3070			177,1
24	339,5889	-30,0500	1,55841		178,6
25	342,9462	-82,8630			188,2
26	-278,5659	-10,4090	1,55841		213,2
27	-262,2800	-34,7850			211,2
28	-2379,1678	-30,0500	1,55841		215,5
29	477,6765	-313,2180			217,9
30	-718,9659	-10,0500	1,55841		224,0
31	-198,9422	-13,4400			221,0
32	-259,1793	-40,2620	1,55841		225,3
33	1506,1087	-1,3000			226,0
34	-301,6161	-10,0500	1,55841		226,5
35	-178,5990	-24,7150			220,0
36	-245,3120	-37,5920	1,55841		228,5
37	100461,9872	-25,1330			228,1
38	0,0000	16,3190			225,8
39	-245,4430	-58,0340	1,55841		228,4
40	320,4148	-9,5780			226,3

Tabelle 4

Fläche	K	Asphären				
		C1	C2	C3	C4	C5
9	0,0000	8,4764E-09	-1,7396E-13	6,8534E-19	4,7627E-23	-7,6484E-27
15	0,0000	8,4764E-09	-1,7396E-13	6,8534E-19	4,7527E-23	-7,6484E-27
19	0,0000	7,6862E-09	-1,4503E-13	2,2501E-18	1,3341E-22	-9,3064E-27
23	0,0000	6,1832E-09	-3,4635E-13	7,1708E-18	-1,5994E-22	3,0136E-27
27	0,0000	-1,1101E-08	1,1415E-13	-1,0141E-18	1,7447E-23	-4,6467E-28
30	0,0000	2,6577E-09	-2,5288E-13	9,6253E-18	-1,7874E-22	1,2375E-26
34	0,0000	7,1212E-09	9,3949E-14	-3,0034E-18	1,7889E-22	-1,8179E-26
41	0,0000	1,6292E-08	-1,4584E-12	6,7046E-17	-2,5613E-21	6,2671E-26
49	0,0000	4,5084E-08	4,5991E-12	4,7389E-17	2,4279E-20	-4,3120E-24

Tabelle 3 Fortsetzung

Fläche	Radius	Dicke	Index	Refl.	D
41	302,9113	-22,1920	1,55841		217,7
42	-169,4134	-14,2420			201,5
43	-227,5800	-51,6750	1,55841		204,5
44	312,0379	-1,3000			204,2
45	-140,9689	-37,4020	1,55841		180,3
46	-390,1742	-1,3000			168,4
47	-210,2591	-37,5460	1,55841		159,7
48	-1051,5017	-1,3000			135,7
49	-177,0965	-48,5830	1,55841		120,4
50	1433,5516	-1,2000			73,3
51	0,0000	-10,0000	1,55841		68,2
52	0,0000	-8,0000			56,0
53	0,0000	0,0000			33,5

Tabelle 5

Fläche	Radius	Dicke	Index	Refl.	D
0	0,0000	36,0000			134,0
1	0,0000	0,0000			146,5
2	21839,4165	10,0000	1,55841		146,5
3	1144,1450	75,0000			149,3
4	0,0000	0,0000		REFL	202,2
5	0,0000	-15,0000			181,7
6	-355,0931	-29,4960	1,55841		194,9
7	1016,5480	-498,1790			195,7
8	256,2069	-15,0000	1,55841		219,4
9	986,7774	-27,9590			231,7
10	235,6173	-15,0000	1,55841		234,1
11	781,0837	-30,0860			258,9
12	260,9988	30,0860		REFL	263,9
13	781,0837	15,0000	1,55841		257,3
14	235,6173	27,9590			229,5
15	986,7774	15,0000	1,55841		226,5
16	256,2069	491,1320			212,8
17	0,0000	7,0470			144,3
18	1016,5480	29,4960	1,55841		143,7
19	-355,0931	1,0000			141,9
20	0,0000	0,0000		REFL	166,4
21	0,0000	-115,0000			140,2
22	-256,6617	-17,1490	1,55841		177,5
23	-495,7192	-37,8010			176,7
24	200,0765	-30,0500	1,55841		177,7
25	216,7185	-73,0740			189,9
26	-479,6895	-27,0640	1,55841		204,5
27	-275,1516	-23,5570			202,2
28	-1589,3959	-26,4070	1,55841		205,0
29	442,3719	-267,3480			207,1
30	-492,2609	-10,0500	1,55841		224,2
31	-193,6583	-14,4370			220,7
32	-250,1179	-41,3440	1,55841		225,7
33	1527,5797	-1,3000			226,1
34	-313,3351	-10,0500	1,55841		225,7
35	-175,5446	-24,9390			218,5
36	-244,0942	-39,3320	1,55841		226,6
37	2832,5746	-22,5340			226,0
38	0,0000	3,1440			222,2
39	-256,2323	-55,9230	1,55841		226,0
40	318,8356	-10,2830			223,8

Tabelle 5 Fortsetzung

Fläche	Radius	Dicke	Index	Refl.	D
41	313,0513	-15,4320	1,55841		213,7
42	-179,6546	-14,8330			199,1
43	-256,2496	-47,7600	1,55841		201,4
44	306,7205	-1,3000			200,9
45	-138,4973	-33,6720	1,55841		176,2
46	-329,2081	-1,3000			165,4
47	-187,5977	-35,6060	1,55841		156,8
48	-1130,2595	-1,3000			136,0
49	-182,0617	-48,1120	1,55841		120,5
50	2218,3519	-1,2000			72,8
51	0,0000	-10,0000	1,55841		68,2
52	0,0000	-8,0000			56,0
53	0,0000	0,0000			33,5

Tabelle 6

Fläche	K	Asphären				
		C1	C2	C3	C4	C5
9	0,0000	8,8766E-09	-1,6857E-13	1,8589E-18	3,8812E-23	-8,3105E-27
15	0,0000	8,8766E-09	-1,6957E-13	1,8589E-18	3,8812E-23	-8,3105E-27
23	0,0000	-8,8840E-09	-4,4228E-14	4,0748E-19	-1,8437E-23	1,3396E-27
27	0,0000	-4,1443E-09	5,8328E-14	-5,8462E-19	1,9357E-23	-9,7708E-28
30	0,0000	3,0781E-09	-2,9796E-13	1,1966E-17	-1,6682E-22	1,6934E-26
34	0,0000	6,6799E-09	1,7313E-13	-7,0332E-18	1,9545E-22	-3,2080E-26
41	0,0000	1,7470E-08	-1,3609E-12	6,7295E-17	-2,6059E-21	6,6203E-26
49	0,0000	4,6366E-08	4,3489E-12	2,0059E-16	2,4690E-22	-4,0588E-25

Tabelle 7

Fläche	Radius	Dicke	Index	Refl.	D
0	0,0000	36,000			136
1	0,0000	0,000			148,3
2	0,0000	10,000	1,55841		148,3
3	0,0000	73,722			150,5
4	0,0000	0,000		REFL	205,1
5	0,0000	-30,000			177,6
6	-510,2342	-26,568	1,55841		192,6
7	729,1643	-441,119			193,7
8	269,7387	-12,500	1,55841		213,9
9	1095,3095	-37,603			223,9
10	184,8893	-12,500	1,55841		226,2
11	496,0801	-26,337			253
12	244,3368	26,337		REFL	258,3
13	496,0801	12,500	1,55841		249,6
14	184,8893	37,603			214,1
15	1095,3095	12,500	1,55841		208,9
16	269,7387	431,119			198
17	0,0000	10,000			132,5
18	729,1643	26,568	1,55841		141,5
19	-510,2342	16,000			147,5
20	0,0000	0,000		REFL	197
21	0,0000	-115,000			155,4
22	-228,3659	-29,178	1,55841		210,5
23	-755,0389	-36,199			209,3
24	288,7379	-30,050	1,55841		209,3
25	271,3506	-102,135			216,9
26	-3740,0722	-30,050	1,55841		212,4
27	-17470,9183	-81,304			212
28	-270,1438	-16,361	1,55841		211,6
29	-372,2562	-77,136			208,7
30	145,7447	-10,050	1,55841		206
31	166,6588	-69,439			214
32	684,5024	-16,923	1,55841		217,8
33	346,1324	-1,300			219,2
34	-476,4704	-10,050	1,55841		216,5
35	-176,0415	-25,156			210,1
36	-379,2686	-29,149	1,55841		213,5
37	1298,9533	-36,351			214,9
38	0,0000	35,051			219,8
39	-226,6203	-24,334	1,55841		219,7
40	-458,4752	-1,300			217,1
41	-167,6660	-34,535	1,55841		218,2

Tabelle 7 Fortsetzung

Fläche	Radius	Dicke	Index	Refi.	D
42	-320,7207	-10,842			211,9
43	-457,0800	-16,137	1,55841		210,2
44	-151,6130	-20,816			195,2
45	-250,6503	-42,717	1,55841		197,1
46	360,2602	-1,300			196,2
47	-237,7582	-24,979	1,55841		183,1
48	-2361,7106	-1,300			178,1
49	-139,7121	-87,106	1,55841		158,6
50	875,7082	-1,300			98,4
51	-250,3316	-13,440	1,55841		85
52	6786,8801	-1,391			73
53	0,0000	-10,000	1,55841		68,4
54	0,0000	-8,000			56,3
55	0,0000	0,000			34

Tabelle 8

Fläche	K	Asphären					
		C1	C2	C3	C4	C5	C6
9	0,0000	8,8068E-09	-2,2357E-13	3,8818E-18	1,1343E-22	-4,9744E-26	5,5024E-30
15	0,0000	8,8068E-09	-2,2357E-13	3,8818E-18	1,1343E-22	-4,9744E-26	5,5024E-30
22	0,0000	5,9182E-09	9,8467E-14	3,2348E-18	-1,4579E-23	8,1375E-27	-1,3307E-31
26	0,0000	1,2698E-08	-1,2953E-13	-8,7759E-18	-1,5329E-22	-1,5718E-26	7,5962E-32
33	0,0000	-1,4957E-08	2,4830E-13	-7,6975E-18	1,3806E-21	-1,5868E-26	
34	0,0000	-1,1079E-09	1,3889E-14	8,3401E-18	6,4570E-22	-2,2809E-26	6,0922E-30
41	0,0000	8,3902E-09	3,2806E-13	9,3886E-19	-1,1478E-21	5,2141E-26	
46	0,0000	-5,6112E-09	7,4939E-14	-3,7772E-17	-1,4124E-22	-6,5393E-26	
47	0,0000	1,8509E-08	-2,1463E-14	8,0276E-18	-4,4509E-21	3,7602E-25	

Patentansprüche

1. Katadioptrisches Projektionsobjektiv zur Abbildung eines in einer
Objektebene angeordneten Musters in eine Bildebene unter
5 Erzeugung eines reellen Zwischenbildes, wobei
zwischen der Objektebene und der Bildebene ein
katadioptrischer erster Objektivteil mit einem Konkavspiegel und
einer Strahlumlenkeinrichtung und hinter der
Strahlumlenkeinrichtung ein, vorzugsweise dioptrischer, zweiter
10 Objektivteil angeordnet ist;
die Strahlumlenkeinrichtung eine erste Spiegelfläche zur
Umlenkung der von der Objektebene kommenden Strahlung
zum Konkavspiegel aufweist; und
hinter der ersten Spiegelfläche zwischen der ersten
15 Spiegelfläche und dem Konkavspiegel in einem optischen
Nahbereich der Objektebene positive Brechkraft angeordnet ist.
2. Projektionsobjektiv nach Anspruch 1, bei dem in dem optischen
Nahbereich der Objektebene die Hauptstrahlhöhe des äußersten
20 Feldpunktes der Abbildung größer ist als die Randstrahlhöhe.
3. Projektionsobjektiv nach Anspruch 1 oder 2, bei dem die
Strahlumlenkeinrichtung eine zweite Spiegelfläche zur
Umlenkung der von dem Konkavspiegel kommenden Strahlung
25 zum zweiten Objektivteil aufweist und das Zwischenbild in der
Nähe der zweiten Spiegelfläche angeordnet ist.
4. Projektionsobjektiv nach Anspruch 3, bei dem das Zwischenbild
vor der zweiten Spiegelfläche angeordnet ist.

5. Projektionsobjektiv nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem in der Nähe des Zwischenbildes, insbesondere zwischen dem Zwischenbild und einer zweiten Spiegelfläche der Strahlumenkeinrichtung, positive Brechkraft angeordnet ist.

5

6. Projektionsobjektiv nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem der katadioptrische erste Objektivteil einen Abbildungsmaßstab $\beta_M > 0,95$ hat, wobei er vorzugsweise einen Abbildungsmaßstab nahe $\beta_M = 1$ aufweist.

10

7. Projektionsobjektiv nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die erste Spiegelfläche in einem von 45° abweichenden Neigungswinkel schräg zur optischen Achse des Projektionsobjektivs angeordnet ist, wobei der Neigungswinkel vorzugsweise zwischen ca. 50° und ca. 55° liegt.

15

8. Projektionsobjektiv nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Inzidenzwinkel der auf die erste Spiegelfläche auftreffenden Strahlung nicht größer als α_0 sind, wobei

$$\alpha_0 = |\arcsin(\beta * NA)| + \frac{\alpha_{HOA}}{2},$$

20

wobei β der Abbildungsmaßstab des Projektionsobjektivs, NA die bildseitige numerische Apertur und α_{HOA} der Winkel ist, der von einem senkrecht zur Bildebene verlaufenden Teil der optischen Achse und einem durch Faltung an der ersten Spiegelfläche entstehenden Teil der optischen Achse eingeschlossen wird.

25

9. Projektionsobjektiv nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem im optischen Nahbereich der Objektebene hinter der

ersten Spiegelfläche eine Einzellinse mit positiver Brechkraft angeordnet ist.

- 5 10. Projektionsobjektiv nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem in einem doppelt durchstrahlten Bereich, insbesondere zwischen der Strahlumlenkeinrichtung und dem Konkavspiegel, mindestens eine Mehrbereichslinse angeordnet ist, die einen in einer ersten Durchtrittsrichtung durchstrahlten ersten Linsenbereich und einen in einer zweiten Durchtrittsrichtung durchstrahlten zweiten Linsenbereich aufweist, wobei der erste Linsenbereich und der zweite Linsenbereich auf mindestens einer Seite der Linse einander nicht überlappen.
- 10 11. Projektionsobjektiv nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem mindestens eine Mehrbereichslinse mit mindestens zwei nebeneinander liegenden Linsenbereichen mit unterschiedlichen Brechungseigenschaften vorgesehen ist, wobei die Mehrbereichslinse vorzugsweise einstückig ausgebildet ist.
- 15 12. Projektionsobjektiv nach Anspruch 11, bei dem die Mehrbereichslinse eine erste und zweite Linsenfläche aufweist und nur eine der Linsenflächen Bereiche unterschiedlicher Durchbiegung aufweist.
- 20 13. Projektionsobjektiv nach Anspruch 11 oder 12, bei dem die Mehrbereichslinse mindestens eine Linsenfläche aufweist, die in mindestens einem Bereich asphärisch ist.
- 25 14. Projektionsobjektiv nach Anspruch 13, bei dem die Mehrbereichslinse mindestens eine Linsenfläche mit Bereichen unterschiedlicher Krümmung aufweist, wobei mindestens einer dieser Bereiche asphärisch ist.
- 30

- 5 15. Projektionsobjektiv nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Strahlumlenkeinrichtung eine vollreflektierende erste Spiegelfläche zur Umlenkung der von der Objektebene kommenden Strahlung zum Konkavspiegel und eine in einem Winkel zur ersten Spiegelfläche angeordnete, vollreflektierende zweite Spiegelfläche zur Umlenkung der vom Konkavspiegel kommenden Strahlung zum zweiten Objektivteil aufweist.
- 10 16. Projektionsobjektiv nach Anspruch 15, bei dem die erste und die zweite Spiegelfläche an einem Strahlumlenkprisma ausgebildet sind.
- 15 17. Projektionsobjektiv nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem in einem Raum geometrisch zwischen der Objektebene und der ersten Spiegelfläche keine positive Brechkraft angeordnet ist.
- 20 18. Projektionsobjektiv nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem zwischen der Objektebene und der ersten Spiegelfläche keine oder nur geringe Brechkraft angeordnet ist.
- 25 19. Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 1 bis 17, bei dem zwischen der Objektebene und der ersten Spiegelfläche negative Brechkraft angeordnet ist.
- 30 20. Projektionsobjektiv nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem ein auf die Objektebene unmittelbar folgendes erstes optisches Element eine im wesentlichen ebene Eintrittsfläche aufweist.

21. Projektionsobjektiv nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem das erste optische Element eine Negativlinse ist.
- 5 22. Projektionsobjektiv nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Projektionsobjektiv objektseitig und bildseitig telezentrisch ist.
- 10 23. Projektionsobjektiv nach einem der vorhergehenden Ansprüche, das für Ultraviolettlicht aus einem Wellenlängenbereich zwischen ca. 120 nm und ca. 260nm ausgelegt ist, insbesondere für Arbeitswellenlängen von ca. 157nm oder ca. 193nm.
- 15 24. Projektionsobjektiv nach einem der vorhergehenden Ansprüche, das eine bildseitige numerische Apertur NA von mehr als 0,7 hat, wobei die bildseitige numerische Apertur NA vorzugsweise mindestens 0,8 beträgt, insbesondere ca. 0,85.
- 20 25. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie mit einem Beleuchtungssystem und einem katadioptrischen Projektionsobjektiv, wobei das Projektionsobjektiv gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche ausgebildet ist.
- 25 26. Verfahren zur Herstellung von Halbleiterbauelementen und anderen fein strukturierten Bauteilen mit folgenden Schritten:
Bereitstellung einer Maske mit einem vorgegebenen Muster;
Beleuchtung der Maske mit Ultraviolettlicht einer vorgegebenen Wellenlänge; und
Projektion eines Bildes des Musters auf ein im Bereich der Bildebene eines Projektionsobjektivs angeordnetes,
30 lichtempfindliches Substrat mit Hilfe eines katadioptrischen Projektionsobjektivs gemäß einem der Ansprüche 1 bis 24.

27. Katadioptrisches Projektionsobjektiv zur Abbildung eines in einer Objekzebene angeordneten Musters in eine Bildebene unter Erzeugung eines reellen Zwischenbildes, wobei
zwischen der Objekzebene und der Bildebene ein
5 katadioptrischer erster Objektivteil mit einem einzigen Konkavspiegel und einer geometrischen Strahlumlenkeinrichtung und hinter der Strahlumlenkeinrichtung ein, vorzugsweise dioptrischer, zweiter Objektivteil angeordnet ist;
mindestens eine senkrecht zu einer optischen Achse
10 ausgerichtete Ebene vorhanden ist, bei der ein in Richtung auf den Konkavspiegel laufendes erstes Strahlbündel und ein von dem Konkavspiegel zurücklaufendes zweites Strahlbündel ohne gegenseitige Überlappung aneinander vorbeilaufen; und
im Bereich dieser Ebene eine Linsenanordnung angeordnet ist,
15 die auf das erste Strahlbündel und das zweite Strahlbündel unterschiedliche optische Wirkung hat.
28. Projektionsobjektiv nach Anspruch 27, bei dem die Linsenanordnung mindestens eine Teil-Linse aufweist, die derart
20 im Bereich der Ebene angeordnet ist, dass eines der Strahlbündel gebrochen wird und die Teil-Linse nicht in das andere Strahlbündel hineinreicht.
29. Projektionsobjektiv nach Anspruch 27, bei dem die Linsenanordnung zwei Teil-Linsen hat, die nebeneinander
25 angeordnet sind.
30. Projektionsobjektiv nach Anspruch 27, bei dem die Linsenanordnung einen scheibenförmigen, transparenten Körper umfasst und mindestens eine Teil-Linse auf dem transparenten
30 Körper befestigt ist.

31. Projektionsobjektiv nach Anspruch 30, bei dem der transparente Körper eine Linse oder eine planparallele Platte ist.
32. Projektionsobjektiv nach Anspruch 30, bei die mindestens eine
5 Teil-Linse durch Ansprengen oder Ankleben auf dem transparenten Körper befestigt ist.
33. Projektionsobjektiv nach Anspruch 28, bei dem eine Teil-Linse, die im Bereich des ersten oder des zweiten Strahlbündels
10 angeordnet ist, positive Brechkraft aufweist.
34. Projektionsobjektiv nach Anspruch 27, bei dem die Linsenanzordnung eine Mehrbereichslinse umfasst, die einen in einer ersten Durchtrittsrichtung durchstrahlten ersten
15 Linsenbereich und einen in einer zweiten Durchtrittsrichtung durchstrahlten zweiten Linsenbereich aufweist, wobei der erste Linsenbereich und der zweite Linsenbereich auf mindestens einer Seite der Mehrbereichslinse einander nicht überlappen.
35. Projektionsobjektiv nach Anspruch 34, bei dem die Mehrbereichslinse zwei Linsenflächen hat und mindestens eine der Linsenflächen in einem von einem ersten Strahlbündel durchstrahlten ersten Bereich und in einem von einem zweiten Strahlbündel durchstrahlen zweiten Bereich unterschiedlich
20 gekrümmt ist.
36. Projektionsobjektiv nach Anspruch 34, bei dem im Bereich der Ebene angeordnete Linsen eine Linsengruppe bilden, die in einem Linsenbereich positive Brechkraft hat.
37. Projektionsobjektiv nach Anspruch 34, bei dem die Mehrbereichslinse mindestens eine Linsenfläche aufweist, die in
30

einem ersten Bereich und in einem zweiten Bereich asphärisch ist, wobei die Bereiche jeweils eine asphärische Form mit einer gemeinsamen sphärischen Basis und unterschiedlichen asphärischen Abweichungen von der gemeinsamen sphärischen Basis aufweisen.

38. Projektionsobjektiv nach Anspruch 27, bei dem Linsen, die im Bereich der Ebene angeordnet sind, in Bezug auf die optische Achse rotationssymmetrisch gekrümmt sind.

39. Projektionsobjektiv nach Anspruch 34, bei dem eine den Konkavspiegel und gegebenenfalls eine oder mehrere in zwei Lichtlaufrichtungen durchlaufene Linsen aufweisende Gruppe optischer Elemente einen wesentlich von 1 abweichenden Abbildungsmaßstab hat, wobei der Abbildungsmaßstab zwischen 0,5 und 0,95 oder zwischen 1,05 und 1,2 liegt.

40. Mehrbereichslinse für ein Projektionsobjektiv, insbesondere für ein katadioptrisches Projektionsobjektiv, wobei die Mehrbereichslinse einen ersten Linsenbereich und einen neben dem ersten Linsenbereich angeordneten zweiten Linsenbereich aufweist und wobei die Linsenbereiche unterschiedliche Brechkraft aufweisen.

41. Mehrbereichslinse nach Anspruch 40, bei dem die Mehrbereichslinse zwei Linsenoberflächen aufweist und mindestens eine der Linsenoberflächen in mindestens einem der Linsebereiche eine asphärische Oberflächenform hat.

42. Mehrbereichslinse nach Anspruch 40, bei dem die Mehrbereichslinse mindestens eine Linsenoberfläche hat, die im ersten Linsenbereich und im zweiten Linsebereich eine

asphärische Form hat, wobei die asphärische Form des ersten Linsebereichs und die asphärische Form des zweiten Linsebereiches eine gemeinsame sphärische Basis haben.

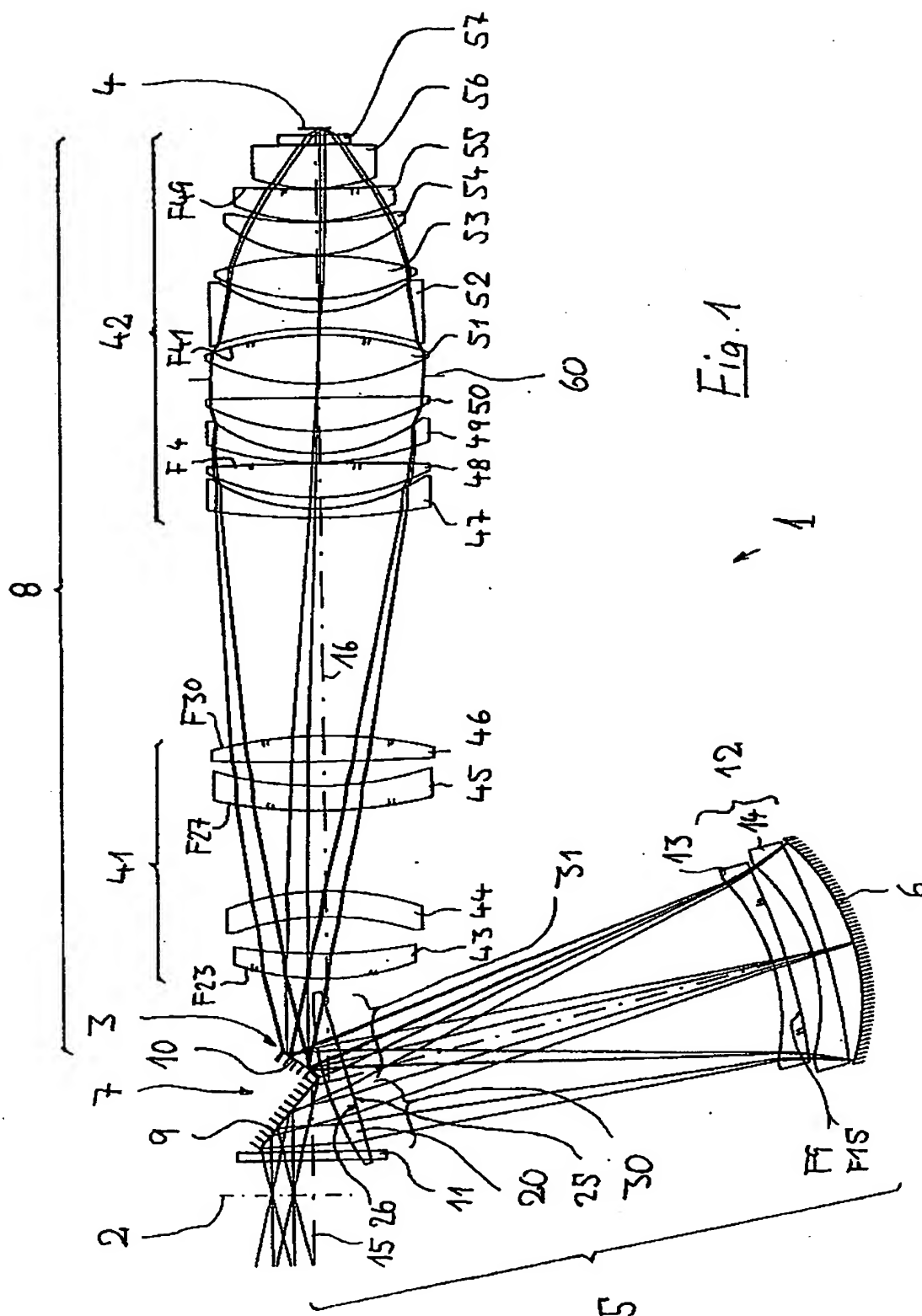
- 5 43. Mehrbereichslinse nach Anspruch 42, bei dem die asphärischen Formabweichungen von der gemeinsamen sphärischen Basis rotationssymmetrisch zu einer gemeinsamen Achse sind.
- 10 44. Mehrbereichslinse nach Anspruch 40, bei der zwischen dem ersten Linsenbereich und dem zweiten Linsenbereich eine nicht für Abbildung vorgesehene Zone liegt, die vorzugsweise nicht-transparent ist.
- 15 45. Optische Linsenordnung, insbesondere für ein Projektionsobjektiv, die Linsenordnung mit einem scheibenförmigen transparenten Körper und mindestens einer auf dem scheibenförmigen Körper befestigten Teil-Linse.
- 20 46. Optische Linsenordnung nach Anspruch 45, bei dem der transparente Körper eine Linse oder eine planparallele Platte ist.
- 25 47. Linsenordnung nach Anspruch 45, bei der der transparente Körper einen ringförmigen Rand hat und im Bereich des ringförmigen Randes in einer im wesentlichen ringförmigen Fassung befestigt ist.
- 30 48. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie mit einem Beleuchtungssystem und einem katadioptrischen Projektionsobjektiv, wobei das Projektionsobjektiv gemäß einem der Ansprüche 27 bis 39 ausgebildet ist.

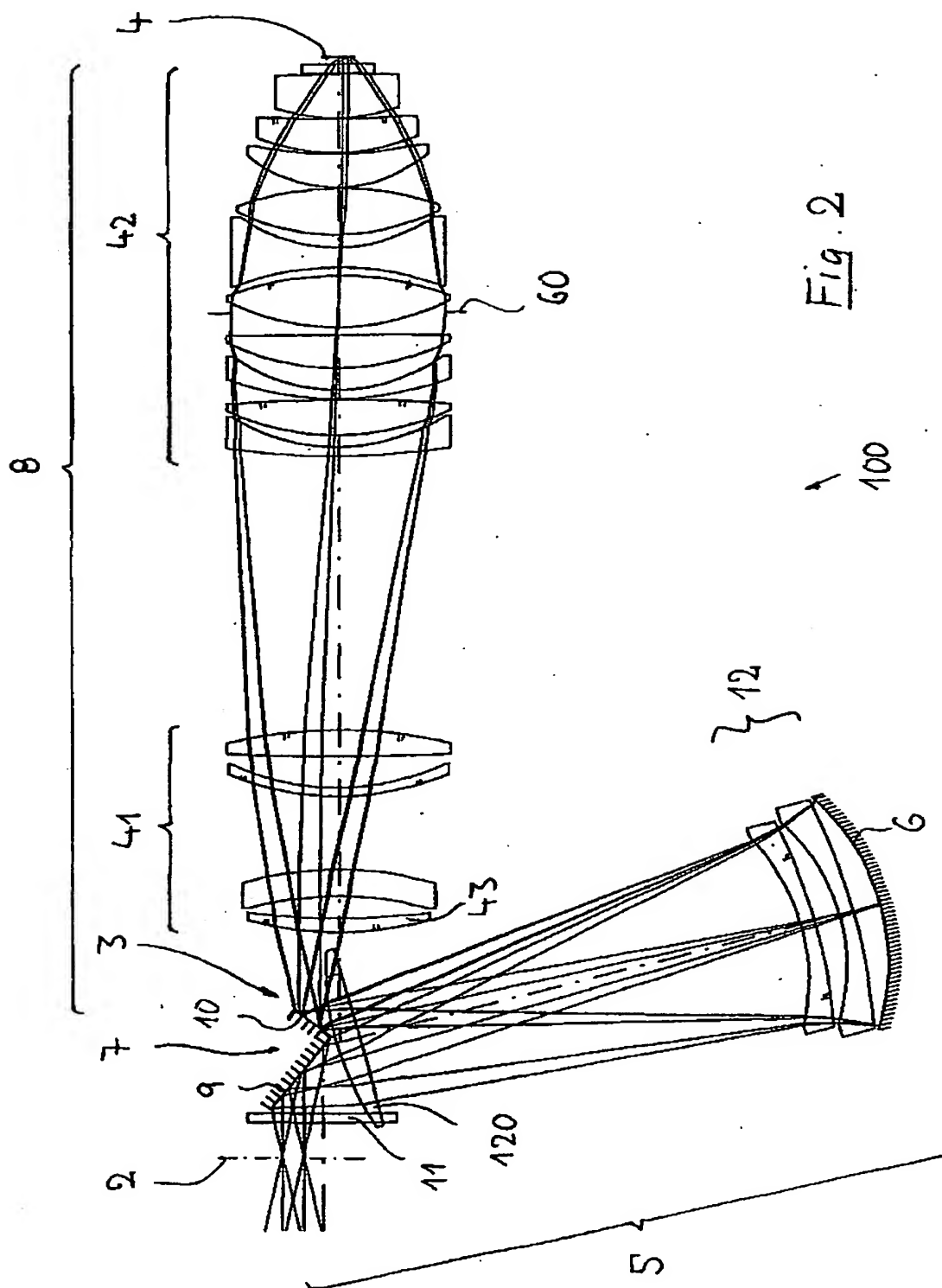
49. Verfahren zur Herstellung von Halbleiterbauelementen und anderen fein strukturierten Bauteilen mit folgenden Schritten:

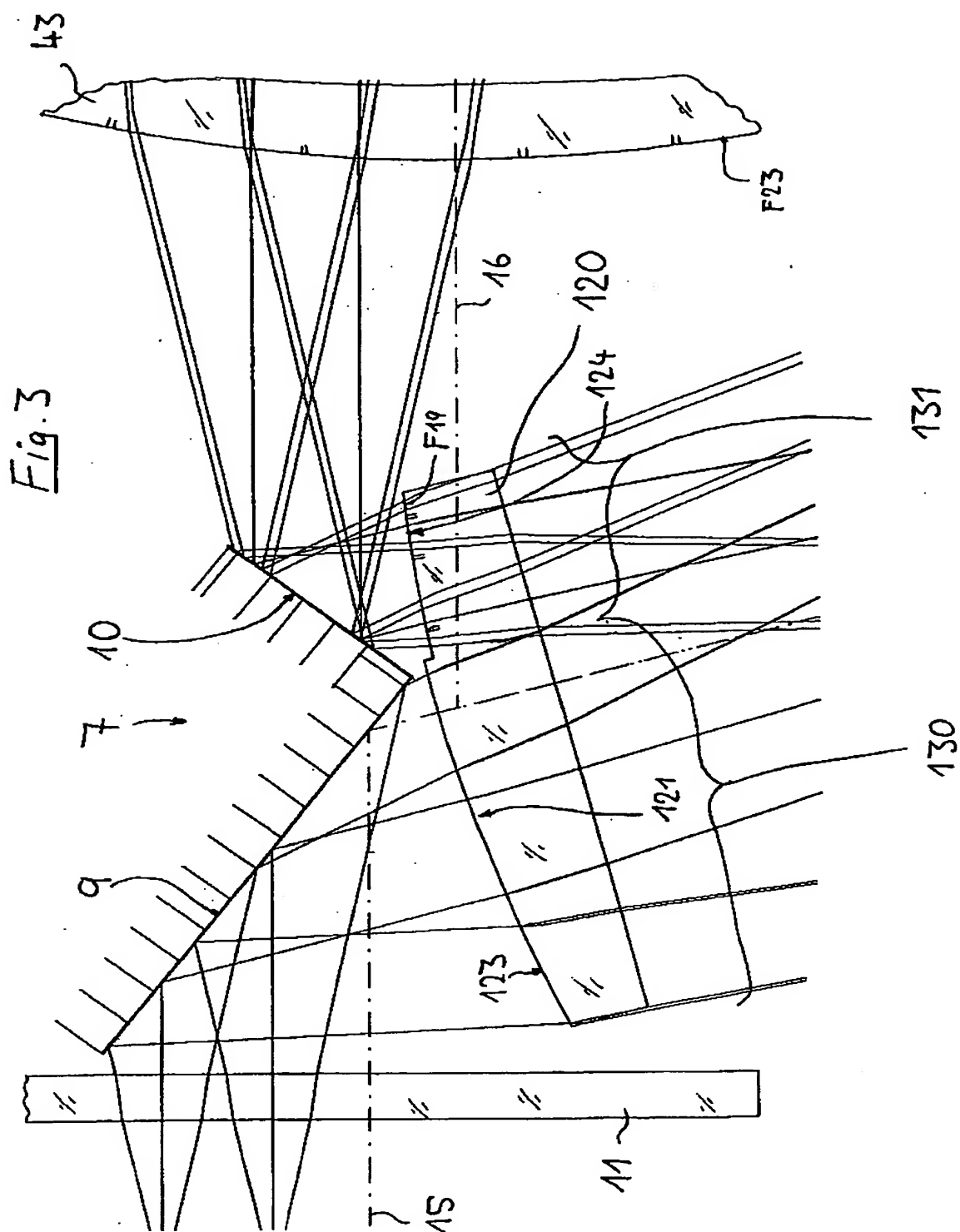
Bereitstellung einer Maske mit einem vorgegebenen Muster;

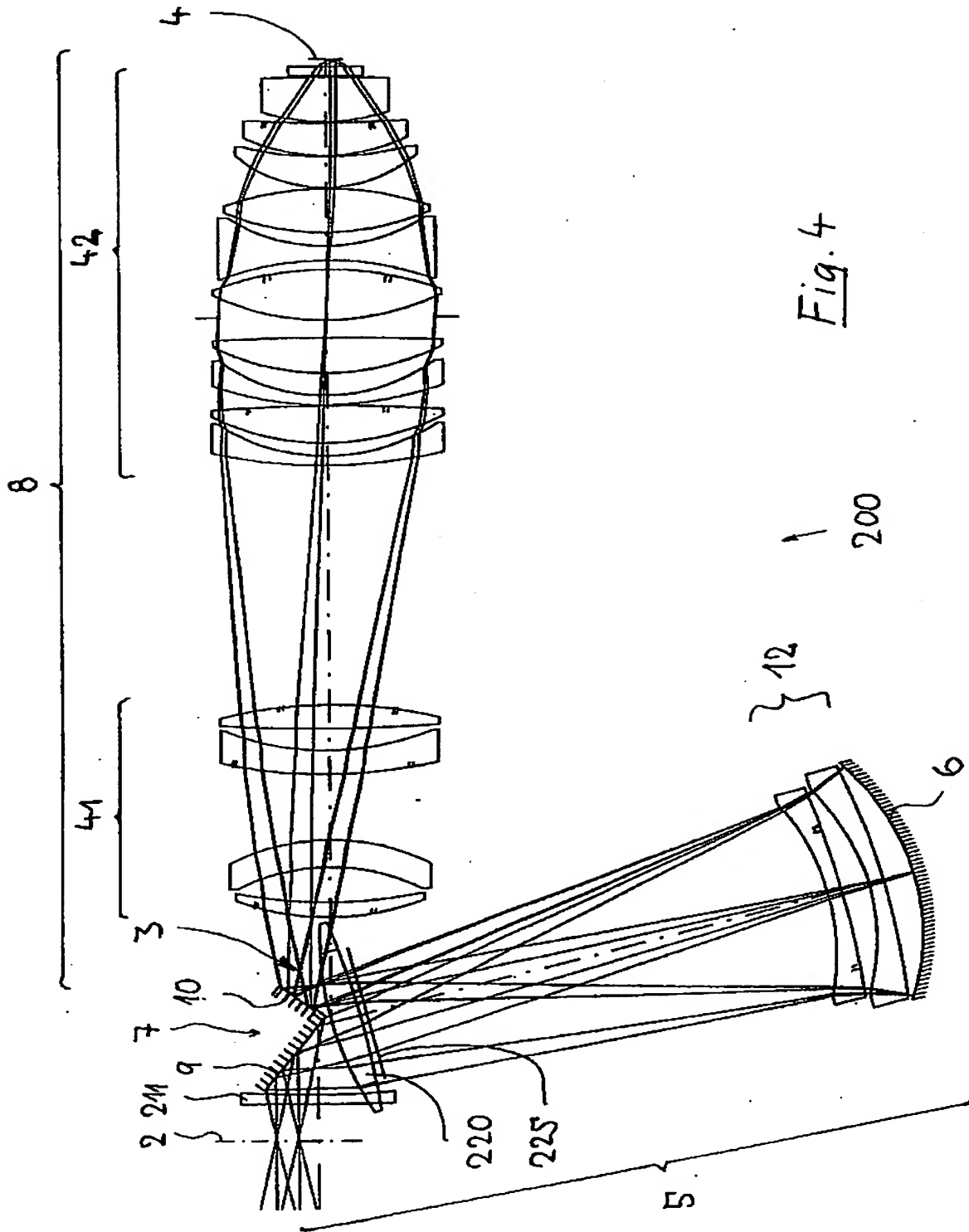
Beleuchtung der Maske mit Ultraviolettlicht einer vorgegebenen Wellenlänge; und

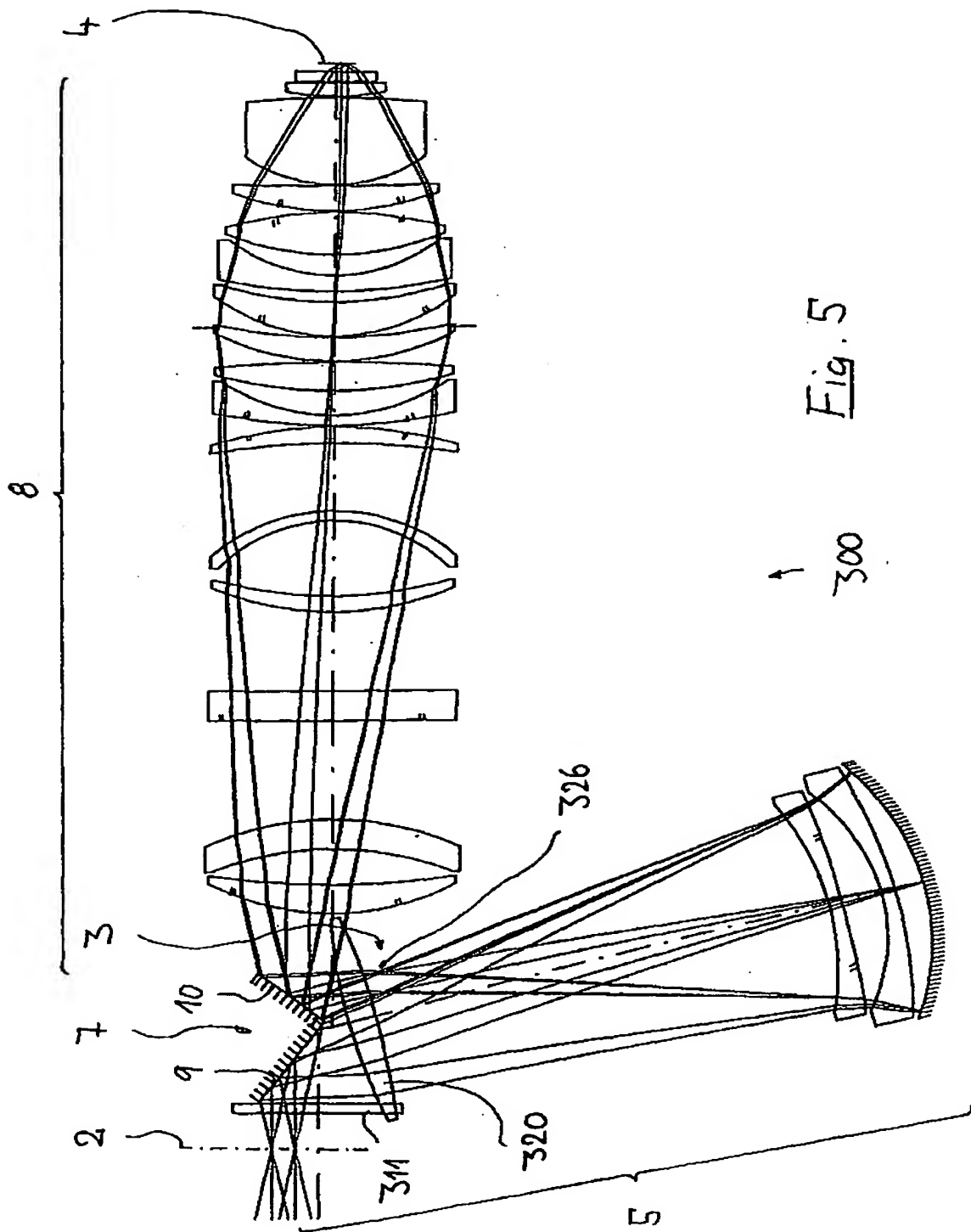
Projektion eines Bildes des Musters auf ein im Bereich der Bildebene eines Projektionsobjektivs angeordnetes, lichtempfindliches Substrat mit Hilfe eines katadioptrischen Projektionsobjektivs gemäß einem der Ansprüche 27 bis 39.

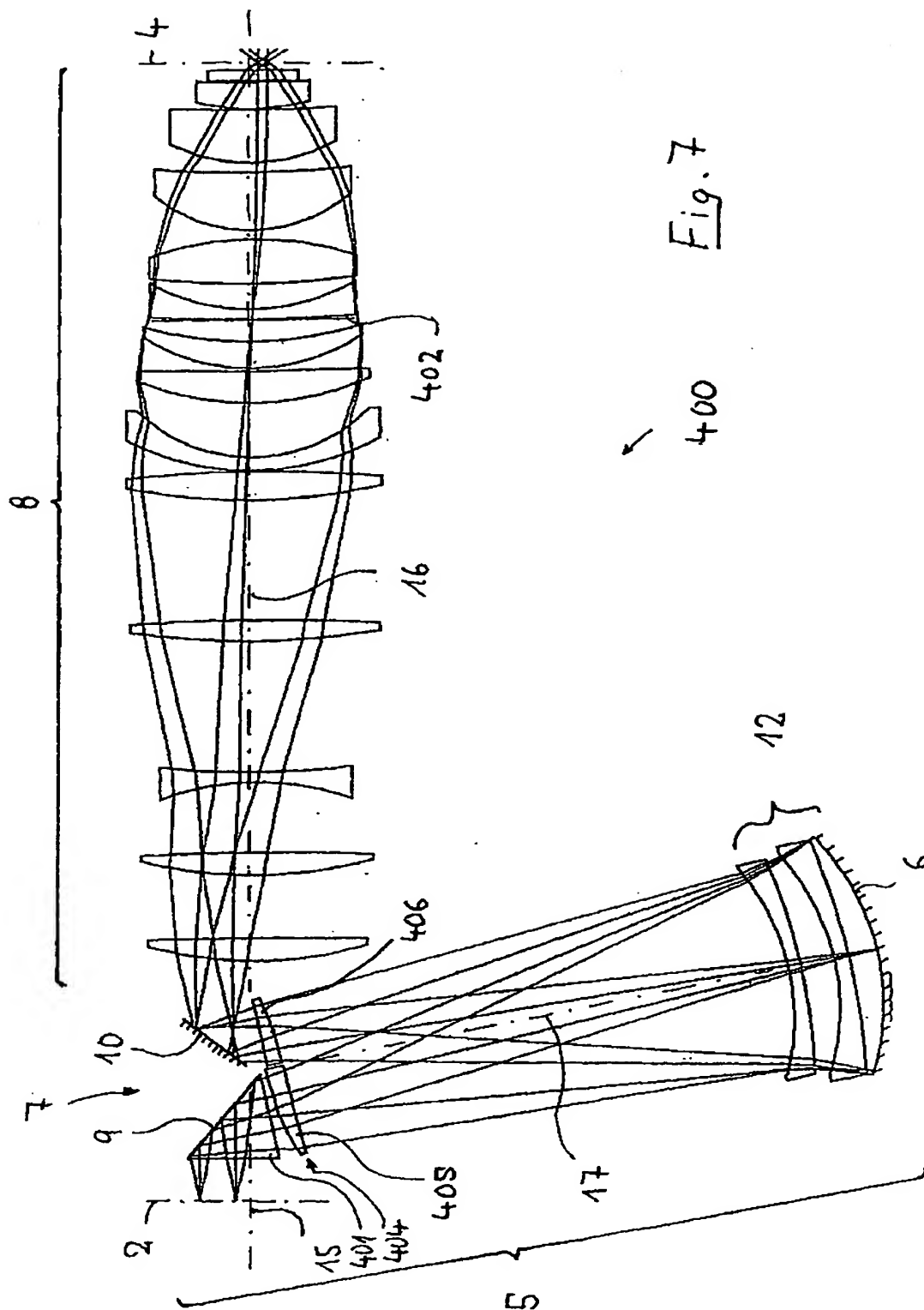












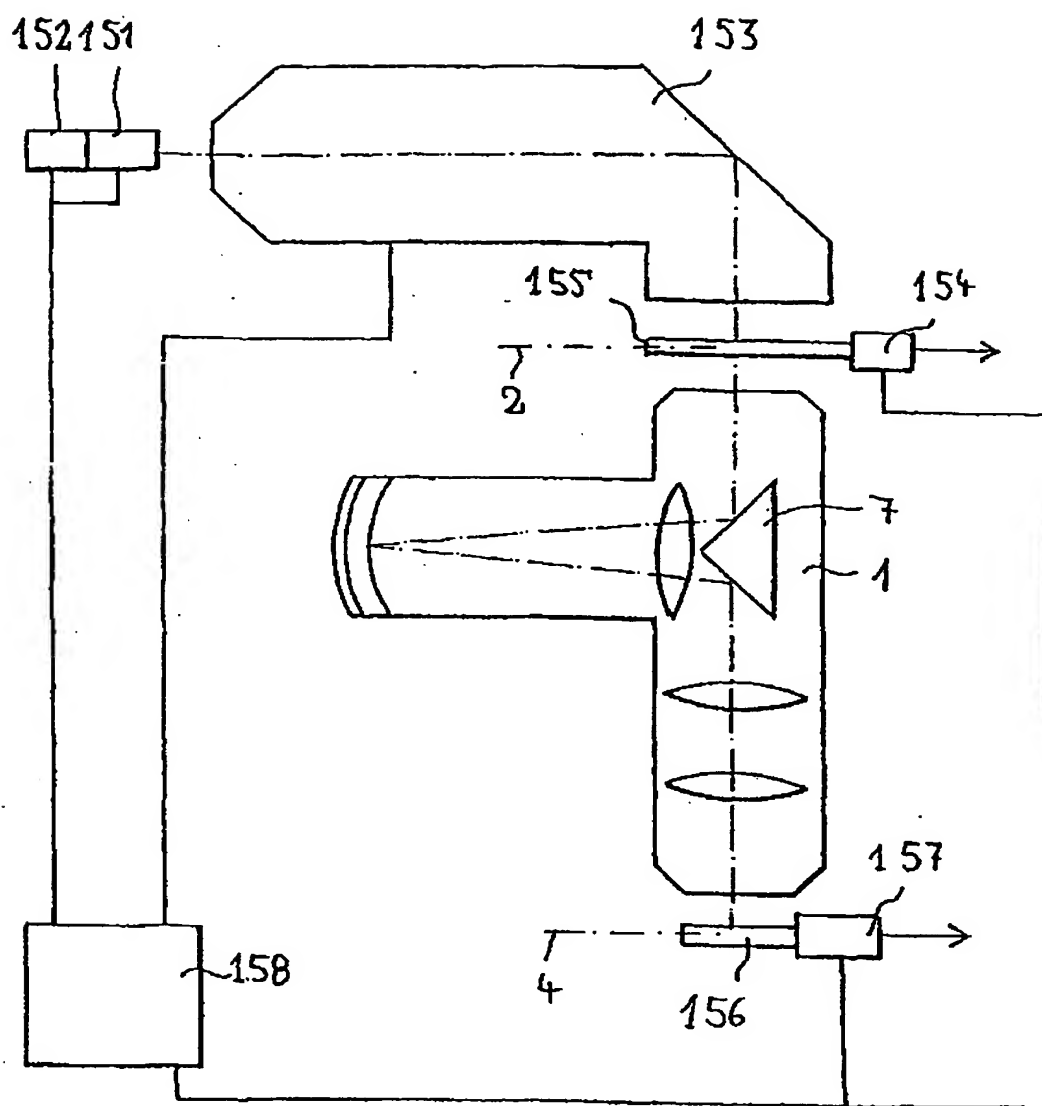


Fig. 8